



Fig. IV.

VAKUUMIST

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



57 let
DVTS

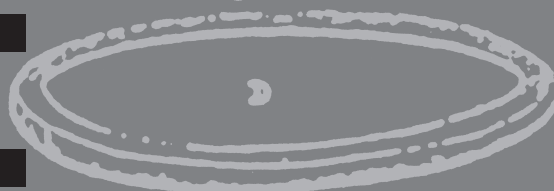
Fig. II.

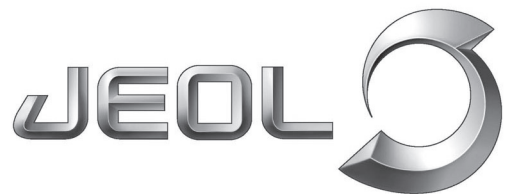
LJUBLJANA, MAJ 2016

ISSN 0351-9716

LETNIK 36, ŠT. 1

UDK 533.5.62:539.2:669-982





Scientific / Metrology Instruments
Multi-purpose Electron Microscope

F2

Entirely revolutionized TEM

New features of F2 :

- . Improved Cold FEG
- . Advanced EELS
- . Dual SDD EDS
- . Advanced Scan System
- . Smart Design
- . SpecPorter
- . Environmentally Friendly



SCAN d.o.o., Preddvor
Nazorjeva 3 · SI-4000 Kranj · Phone +386-4-2750200
www.scan.si · info@scan.si

www.jeol.com

VAKUUMIST 36/1, maj 2016

VSEBINA

ČLANKI

Vakuumska cementacija

Mihael Brunčko, Peter Kirbiš, Ivan Anžel. 4

Celični kovinski materiali

Branko Nečemer, Franc Zupanič, Zoran Ren. 13

Prva fotografiranja nadzvočnih izstrelkov sina graščaka spod Gorjancev (ob stoletnici smrti Ernsta Macha)

Stanislav Južnič 19

DRUŠTVENE NOVICE

Sporočilo za javnost – Modularni detektor netesnosti ASI 35. 27

Sporočilo za javnost – Pfeiffer Vacuum že 50 let postavlja standarde v detekciji netesnosti 28

VAKUUMIST

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

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

Glavni in odgovorni urednik: doc. dr. Miha Čekada

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

Tehnični urednik: Miro Pečar

Lektor: dr. Jože Gasperič

Korektor: dr. Matjaž Finšgar

Oblikovanje naslovnice: Ignac Kofol

Tisk: NONPAREL, d. o. o., Barletova 4z, 1215 Medvode

Naklada: 300 izvodov

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

Letna naročnina: 25 EUR

ISSN 0351-9716

UDK 533.5.62:539.2:669-982

Izdaja Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije

Teslova 30
1000 Ljubljana

Tel. (01) 477 66 00

E-pošta: info@dvts.si

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

Številka transakcijskega računa pri NLB: 02083-0014712647

Uredništvo Vakuumista

doc. dr. Miha Čekada
glavni in odgovorni urednik Vakuumista
Institut »Jožef Stefan«
Jamova 39
1000 Ljubljana

e-pošta: miha.cekada@ijs.si

tel.: (01) 477 38 29

faks.: (01) 251 93 85

VAKUUMSKA CEMENTACIJA

Mihael Brunčko, Peter Kirbiš, Ivan Anžel

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

STROKOVNI ČLANEK

POVZETEK

Vakuumska cementacija je sodoben, zelo učinkovit in ekološko sprejemljiv postopek termokemične toplotne obdelave jekel, pri katerem jeklo z malo ogljika površinsko naogljčimo in nato zakalimo. Metoda je danes že na številnih področjih zamenjala klasično plinsko cementacijo zaradi boljše ponovljivosti in enakomernosti doseženih cementiranih plasti obdelovancev. Vakuumska cementacija je proces, ki je izveden v atmosferi ogljikovodikov, kot je acetylen, pri zelo nizkem parcialnem tlaku, ki je navadno pod 20 mbar, v razmerah, ki so daleč od termodinamskega ravnovesja. Globino cementirane plasti in koncentracijski gradient dosežemo pri vakuumski cementaciji z regulacijo časa trajanja aktivnih (faza ogljčenja) in pasivnih (faza difuzije) faz procesa.

V prispevku so predstavljene osnove vakuumske cementacije jekel, njene prednosti in slabosti v primerjavi s klasično plinsko cementacijo ter metode, ki omogočajo spremljanje procesa vakuumske cementacije. V sklepu prispevka podajamo opis raziskovalnega dela, opravljenega na Inštitutu za tehnologijo materialov na Fakulteti za strojinštvo v Mariboru na področju razvoja neporušne merilne metode, namenjene spremljanju vakuumske cementacije jekel.

Ključne besede: vakuumska cementacija, globina cementirane plasti, neporušne merilne metode, sprotne meritve električne upornosti

Vacuum carburizing

ABSTRACT

Vacuum carburizing is a modern, very efficient and environmentally friendly process for case hardening of steels, where the low carbon steel is first surface carburized and then quenched. Nowadays the technology has replaced atmosphere carburizing in many cases due to better repeatability and uniformity of heat treated samples. The process of vacuum carburizing is performed under oxygen-free hydrocarbon gas atmosphere, usually pure acetylene at partial pressure lower than 20 mbar and in conditions which are far from thermodynamic equilibrium. The process consists of the cycles of active (saturation) and passive (diffusion) stages. Desired case depth and corresponding target concentration profile of carbon can be supervised by controlling the duration of these two stages.

The present paper describes the fundamentals of vacuum carburizing of steels and its advantages compared with the conventional gas carburizing procedure. Additionally, the measurement methods enabling monitoring of the process are presented. In the conclusion of the paper, the research work, made on the Institute of Materials Technology (Faculty of Mechanical Engineering Maribor) which is dealing with development of nondestructive in-situ measurement method for monitoring of vacuum carburizing process is discussed.

Keywords: vacuum carburizing, carburized zone, non-destructive measurement method, in-situ electrical resistance measurement

1 OSNOVE VAKUUMSKE CEMENTACIJE

Vakuumska cementacija je moderen in tehnološko napreden postopek obdelave jekel, pri katerem jeklo z malo ogljika površinsko naogljčimo navadno do koncentracije C 0,8–0,9 % in ga nato zakalimo. Končni rezultat cementacije sta z ogljikom obogatena površi-

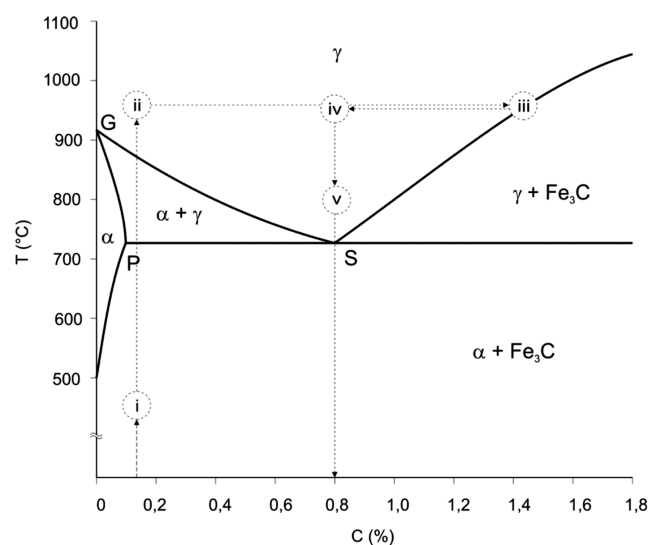
na, ki je po poboljšanju trda, in jedro, ki ostane žilavo. V primerjavi s klasično plinsko cementacijo, kjer poteka ogljčenje pri tlaku plina za cementacijo, ki je blizu atmosferskemu ali višji, poteka proces vakuumske cementacije v vakuumski peči pri nizkem parcialnem tlaku plina za cementacijo (do 20 mbar) [1–13].

Proces je navadno sestavljen iz več faz (**slika 1**): (i) faza evakuiranja (do 10^{-1} mbar), (ii) faza segrevanja do izotermne temperature žarjenja (med 900 °C in 1050 °C – odvisno od sestave jekla), (iii) faza ogljčenja ali aktivna faza, pri kateri dovajamo plin za cementacijo v komoro peči (do 20 mbar), (iv) faza difuzije ali pasivna faza – v tej fazi poteka difuzija ogljika v obdelovanec v vakuumu (10^{-1} mbar), in (v) faza kaljenja, ki navadno poteka v plinskem mediju: N₂, He ali H₂, redkeje v oljni kopeli [1–18].

Tabela 1: Disociacija plinov za vakuumsko cementacijo ($T = 900\text{--}1000$ °C in $p \leq 20$ mbar):

Plin	Potek disociacije
Metan	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + \text{H}_2$
Etilen	$\text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C} + \text{CH}_4$
Propan	$\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{C} + 2\text{CH}_4$
	$\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{CH}_4$
	$\text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{C} + 2\text{H}_2 + \text{CH}_4$
Acetylen	$\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{C} + \text{H}_2$

V aktivni fazi oz. fazi ogljčenja sprožimo ogljčenje preizkušanca z dovajanjem reaktivnega plina navadno nasičenega, nenasičenega ali cikličnega ogljikovodika (CH₄, C₃H₈, C₂H₂, C₂H₄, C₆H₆ ...) ali



Slika 1: Potek vakuumske cementacije

mešanice le-tega s H_2 ali N_2 v vakuumsko komoro peči. Pri dani temperaturi cementacije ogljikovodik razpade v več vmesnih stopnjah na ogljik in vodik (**tabela 1**). Ogljik se nato adsorbira na površini preizkušanca in difundira v njegovo notranjost. Pri tem je stopnja disociacije plina in njegova učinkovitost za cementacijo odvisna od temperature in parcialnega tlaka plina v atmosferi.

Tako je značilno, da je v temperaturnem območju med $900\text{ }^\circ\text{C}$ in $1000\text{ }^\circ\text{C}$ pri parcialnem tlaku plina pod 20 mbar stopnja disociacije za metan (CH_4) zelo majhna in plin ni primeren za doseganje večjih koncentracij ogljika na površini obdelovanca ter večjih globin cementirane plasti [5, 8, 21]. Bistveno boljše rezultate je mogoče doseči z uporabo propana (C_3H_8) ali etilena (C_2H_4). Njuna slabost je le v tvorbi velike količine saj v komori peči in neprimernosti za cementacijo obdelovancev z izvrtinami [8].

Najboljši učinek dosežemo z uporabo acetilena (C_2H_2), ki direktno razpade v ogljik in vodik (**tabela 1**) z minimalno tvorbo saj na površini obdelovancev in v komori peči [8]. Tako ostane površina obdelovancev po cementaciji čista in gladka, stroški vzdrževanja peči v primerjavi z uporabo propana pa so bistveno nižji. Za primerjavo, pri enaki temperaturi in parcialnem tlaku plina se učinkovito za cementacijo porabi le 7% propana, medtem ko je poraba acetilena 50% . Izkoristek je še slabši pri klasični plinski cementaciji, kjer se le 1% plina učinkovito izkoristi za cementacijo [11]. Acetilen je prav tako zelo primeren za cementacijo obdelovancev kompliciranih oblik z globokimi izvrtinami, saj tvori zelo enakomerno globino cementirane plasti, neodvisno od oblike obdelovanca tudi pri zelo nizkih parcialnih tlakih.

Za doseg enakomerne plasti cementacije je treba zagotoviti enakomerno adsorpcijo ogljika po celotni površini obdelovanca. Večjo adsorpcijo lahko izboljšamo s (i) prisilnim mešanjem plina v vakuumski komori, (ii) povečanjem parcialnega tlaka plina ali (iii) izbiro plina z večjo stopnjo disociacije. Vendar ima povečanje parcialnega tlaka plina tudi svoje slabe lastnosti: poveča se poraba plina za cementacijo ob še večji tvorbi saj v komori peči.

Problemu saj se je mogoče izogniti z (i) redčenjem plina ogljikovodika z vodikom ali dušikom, s tem povečamo tlak v komori, ne da bi povišali parcialni tlak plina ogljikovodika, (ii) s povečanjem cirkulacije plina s pulznim delovanjem vakuumskih črpalk, kar vpliva na bolj učinkovito izrabo plina tudi pri nižjih parcialnih tlakih in (iii) z aktivacijo plina s plazmo, ki se navadno uporablja pri plinih z manjšo stopnjo disociacije, kot je na primer metan – cementacija s plazmo [2–5].

1.1 Jekla, primerna za vakuumsko cementacijo

Jekla, primerna za ogljičenje, vsebujejo od $0,1\%$ do $0,25\%$ C z glavnimi legirnimi elementi mangan, krom, molibden in nikelj. Največji vpliv ima krom, ki je močan karbidotvorec (tvori karbide – spojine kroma in ogljika). Jekla izbiramo glede na potrebno trdnost in žilavost jedra ter odpornost proti obrabi površine. Delimo jih na:

- ogljikova cementacijska jekla, ki jih uporabljamo pri konstrukcijskih delih, ki morajo imeti trdno površino in žilavo jedro z majhno obremenitvijo;
- kromova cementacijska jekla, ki jih uporabljamo, ko je potrebna dobra odpornost proti obrabi;
- krom-manganova in krom-nikljeva jekla, ki se uporabljajo za zelo obremenjene konstrukcijske dele, za katere je potrebna trdna površina z večjo trdnostjo jedra in dobro žilavostjo.

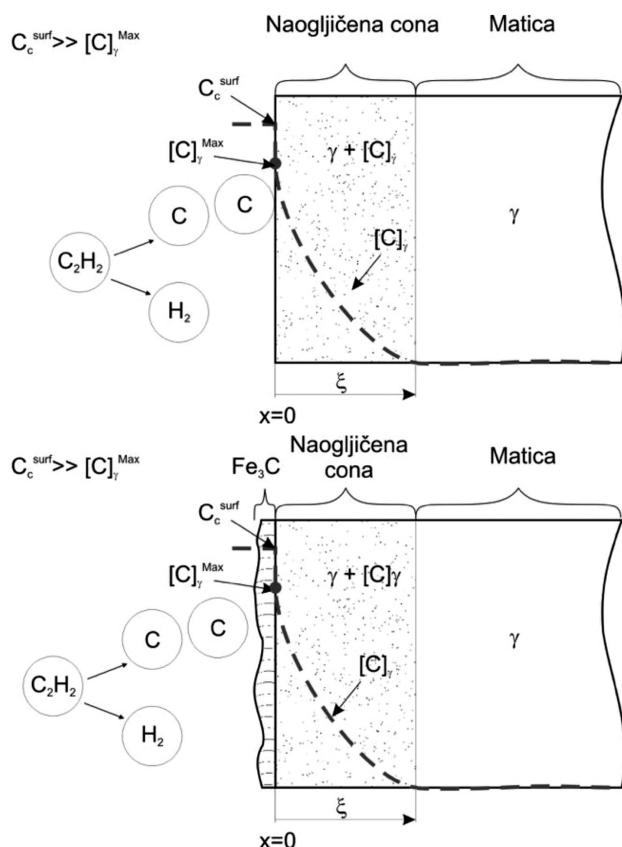
Vakuumsko cementacija se uporablja za cementiranje zobnikov, zobatih kolesc, gredi, rezil, rezkal, matric, pogonskih zobnikov in gredi, šob za vbrizgavanje goriva ...

2 FIZIKALNO-KEMIJSKO OZADJE VAKUUMSKE CEMENTACIJE

Za vakuumsko cementacijo je značilno, da je koncentracija ogljika v komori peči vedno bistveno višja od maksimalne topnosti ogljika v avstenitu pri dani temperaturi cementacije in tako poteka nadzor koncentracije ogljika na površini obdelovanca s spreminjanjem časovnih intervalov trajanja aktivne faze (faze ogljičenja) in pasivne faze (faze difuzije) oz. razmerjem med tema dvema fazama ter številom njunih ciklov [1–18].

Fizikalno-kemijsko ozadje pojavov, ki se odvijajo med aktivno in pasivno fazo vakuumsko cementacije bomo razložili na primeru ogljičenja čistega železa z acetilenom pri temperaturi cementacije $950\text{ }^\circ\text{C}$. Proces vakuumsko cementacije se vedno začne s segrevanjem obdelovanca v vakuumu do zelene izotermne temperature, kjer sprožimo aktivno fazo oz. fazo ogljičenja z dovodom acetilena z želenim parcialnim tlakom v komoro peči. Obdelovanec je nato izpostavljen tej atmosferi za predpisan čas trajanja aktivne faze t_A . Acetilen je nenasičen ogljikovodik, ki pri visoki temperaturi razpade s katalitično reakcijo v ogljik in vodik ($C_2H_2 \rightarrow 2 [C]_v + H_2$).

Katalitična reakcija poteče le v stiku s površino kovine (**slika 2a**) [21]. V nadaljevanju se atomi ogljika adsorbirajo na površini obdelovanca, ki je zaradi velike stopnje disociacije acetilena že v zelo kratkem času popolnoma prenasočena. Posledično se na površinski plasti obdelovanca tvori plast cementita Fe_3C in tudi drugih karbidov (legirana jekla) (**slika 2b**).

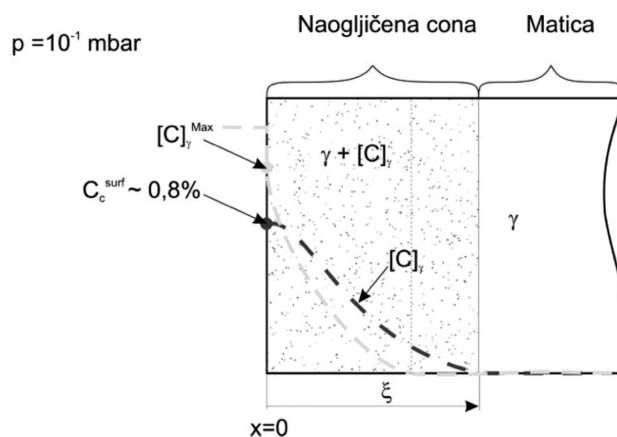


Slika 2: Aktivna faza vakuumske cementacije: adsorpcija in difuzija ogljika (a) ter tvorba cementitne plasti (b)

Karbidni drugih legirnih elementov ne delujejo kot katalizator, tako se rast karbidne plasti ustavi – aceten iz atmosfere ne razpade ob stiku s površino. Notranji volumen preizkušanca se v nadaljevanju procesa napaja z ogljikom le preko ogljika, ki nastane z disociacijo karbidov iz zunanje karbidne plasti [22, 23].

Za aktivno fazo vakuumske cementacije je tako značilno, da je koncentracija ogljika v površinskem sloju avstenita bistveno višja od zelene (0,8 % do 0,9 % ogljika), prav tako je koncentracijski gradient ogljika v površinski plasti zelo strm, tvorba cementita in drugih karbidov (legirana jekla) pa zaviralno vpliva na difuzijo ogljika, saj zavre katalitičen razpad acetilena. Za aktiviranje nadaljnje rasti naogljličene plasti in zmanjšanje koncentracije ogljika na optimalno, mora aktivni fazi slediti še pasivna.

V pasivni oz. difuzijski fazi sledi za optimalni konec adsorpcije ogljika in njegove difuzije v notranjost ponovno evakuiranje komore peči in žarjenje obdelovanca v vakuumu za predpisan čas t_p . V tej fazi dosežemo razpad površinske plasti cementita ter difuzijo ogljika iz naogljličene površine obdelovanca v notranjost (slika 3). Pasivna faza traja tako dolgo, da dosežemo želena globino naogljličene plasti in koncentracijski gradient v njej. Dosego zelene koncen-



Slika 3: Pasivna faza vakuumske cementacije

tracije ogljika in globine cementirane plasti ter preprečitev prekomernega naogljičenja in tvorbe karbidov na površini obdelovanca dosežemo s ciklično izmenjavo aktivne in pasivne faze. Čas trajanja aktivne in pasivne faze je navadno v razmerju od 1 : 2 do 1 : 3 v korist pasivne faze [13].

Cementacija v vakuumu se konča s kaljenjem. V tej fazi znižamo temperaturo peči na temperaturo kaljenja in nato obdelovanec kalimo – navadno s plinom ali v oljni kopeli.

2.1 Vpliv razmerja med časom aktivne in pasivne faze ter številom ciklov na globino cementirane plasti

Eksperimentalne raziskave so pokazale [13], da ima razmerje med aktivno in pasivno fazo pri enakem skupnem času procesa $t = Nt_A + Nt_P$ (pri krajših časih t_p se ustrezno podaljša število ciklov N , tako da ostane skupen čas procesa t enak) minimalen vpliv na globino cementirane plasti. V viru [13] navajajo, da je efektivna globina cementirane plasti h_{ef} največja pri razmerju $t_A/t_P = 1/1$ ter da se zmanjšuje s korakom pribl. 0,15 mm pri $t_A/t_P = 1/2$ do $t_A/t_P = 1/3$. Na drugi strani pa ima razmerje odločilen vpliv na globino karbidne plasti, ki je največje pri razmerju 1/1 ter najmanjše pri razmerju 1/3 (za 0,24 mm). Podobne ugotovitve veljajo tudi za število ciklov N . Večje število ciklov ima večji vpliv na povečanje globine karbidne plasti kot pa na efektivno globino cementirane plasti.

Pri krajših časih pasivne faze (1/1) se tako na celotni površini preizkušanca tvori navidezno kontinuirna plast karbidov. Podobna opažanja so tudi pri eksperimentih, ki so potekali samo v eni stopnji brez cikliranja. Tako ima formacija karbidne plasti na površini obdelovanca vpliv, da: (i) stabilizira proces in (ii) pospeši difuzijo ogljika iz karbidne plasti v notranjost. Na drugi strani je seveda karbidna plast na površini neželena na končnih izdelkih. Zato se v

zadnjih ciklih procesa vedno podaljša čas trajanja pasivne faze procesa. Tako lahko s spremembo razmerja t_A/t_P vplivamo tudi na debelino cone karbidov in njihovo morfologijo ter posledično tudi na mehanske lastnosti obdelovanca.

V praksi se je pokazalo, da je najučinkovitejše z vidika ekonomičnosti procesa ter vidika morfologije karbidne cone ter mehanskih lastnosti obdelovanca, da je čas trajanja pasivne faze nekoliko krajši na račun povečanja števila ciklov N . Tako v viru [13] priporočajo: $t_A = 5$ min in $t_P = 10$ min v prvih ciklih procesa ter podaljšanje t_P na 25 min do 40 min v zadnjih ciklih procesa. Podaljšanje časa trajanja pasivne faze v zadnjem ciklu ima tako vpliv na zmanjšanje prenasičenosti površinske plasti z ogljikom, kar ugodno vpliva na morebitno nadaljnjo mehansko obdelavo obdelovancev.

Podaljšanje pasivne faze v zadnjem ciklu ima tudi ugoden vpliv na morfologijo karbidnih delcev, ki so enakomerno dispergirani po volumnu, nekoliko se tudi poveča debelina cone karbidov zaradi difuzije raztopljenega ogljika v notranjost, gostota karbidnih delcev pa ni tako velika. Na račun povečanja časa trajanja pasivne faze se zmanjša tudi delež tvorjene karbidne plasti na površini obdelovanca ter prav tako se zmanjša prenasičenost površinskega sloja z ogljikom. Na površini obdelovanca se tvori Fe_3C že po 60 s izpostavitve acetilenu pri 930 °C in po 60 s žarjenja v vakuumu plast tvorjenega Fe_3C ponovno disociira in ogljik difundira v notranjo plast obdelovanca [13].

2.2 Nadzor in spremljanje procesa vakuumske cementacije

Nadzor cementacije v vakuumu je odvisen od razumevanja vpliva številnih parametrov, ki imajo vpliv na adsorpcijo in difuzijo ogljika v obdelovancu [3–20]. Ti parametri so:

- čas trajanja procesa, ki pomeni vsoto časov trajanja aktivne in pasivne faze oz. vsoto števila ciklov teh dveh faz;
- temperatura;
- atmosfera (vrsta plina, tlak, pretok).

Na izbiro gornjih procesnih parametrov vpliva površina in geometrija obdelovanca, sestava jekla, zelena globina cementirane plasti in potek koncentracijskega gradienta v njej.

V primerjavi s plinsko cementacijo pri tlaku, ki je blizu atmosferskemu ali višji in jo kontroliramo oz. reguliramo s spreminjanjem ogljikovega potenciala v plinski atmosferi. Skladno s posamezno stopnjo procesa poteka regulacija cementacije v vakuumu nekoliko drugače. Pri klasični plinski cementaciji navadno spremljamo globino cementirane plasti posredno z nadzorom atmosfere v peči s kisikovo sondo.

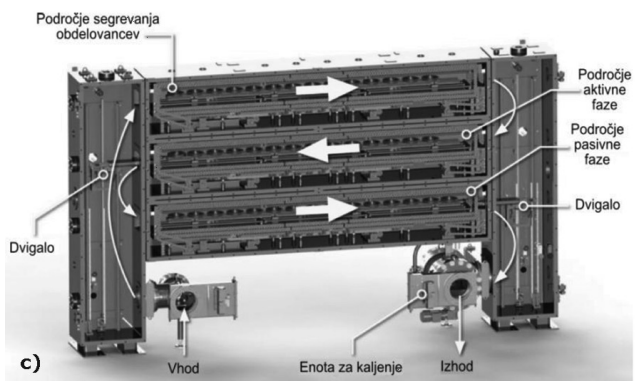
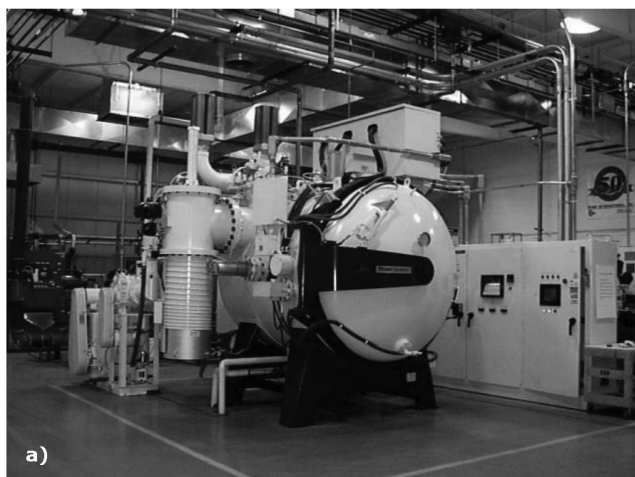
Nasprotno za nadzor vakuumske cementacije ne moremo uporabiti kisikove sonde, saj poteka cementacija v vakuumu. Tako ob konstantnih procesnih parametrih (pri temperaturi cementacije in parcialnemu tlaku ogljikovodika v atmosferi) nadziramo globino cementirane plasti in koncentracijski gradient ogljika v njej s spreminjanjem dolžine trajanja aktivne in pasivne faze ter s številom obeh faz. Za doseg ustreznega števila ciklov in časa trajanja aktivne in pasivne faze se navadno v industrijskem okolju uporabljajo računalniško-simulacijski programi, s katerimi zmanjšamo število poskusnih serij proizvodnje. Računalniško-simulacijski program, temelječ na empirično razviti bazi podatkov, na osnovi znanih procesnih parametrov (temperaturi cementacije in parcialnemu tlaku ogljikovodika v atmosferi) in sestavi jekla določi koncentracijo ogljika na površini obdelovanca in difuzijsko hitrost ogljika ter napove globino in koncentracijski gradient ogljika v naogljicheni plasti [2,13].

Prekomerno ogličenje in tvorjenje karbidov se preprečuje oz. nadzoruje s spreminjanjem oz. s ciklično izmenjavo faze ogličjenja in faze difuzije ter časov trajanja le-teh. Ker je atmosfera vedno prenasičena z ogljikom, tako reguliramo tudi globino ter koncentracijski profil ogljika v naogljicheni plasti stopenjsko z izmenjavanjem faze ogličjenja in faze difuzije.

3 MODULARNA ZASNOVA OPREME ZA VAKUUMSKO CEMENTACIJO

Sodobne peči za vakuumsko cementacijo so modularno zasnovane, lahko so enokomorne, opremljene z enoto za kaljenje pod visokim tlakom (do 20 mbar) s plini, kot so N_2 , N_2/He , He in N_2/H_2 . Peči za vakuumsko cementacijo so zasnovane na grafitnih grelcih z grafitno izolacijo ali SiC-grelcih s klasično oksidno izolacijo. Še bolj učinkovite so dvokomorne peči, kjer je prva komora peč za segrevanje obdelovanca na zeleno temperaturo ogličjenja, druga pa je namenjena kaljenju obdelovanca v olju in/ali v plinski atmosferi pri visokem tlaku. Mogoče so tudi kontinuirne izvedbe peči, sestavljene iz več komor, v katerih lahko ob procesu vakuumske cementacije in kaljenja izvajamo tudi poboljšanje obdelovancev za doseganje boljše žilavosti materiala (**slika 4a**). Cementacija obdelovancev lahko poteka v šaržah, kjer je večje število obdelovancev naloženih na pladnje v peči (**slika 4b**).

Najnovije peči pa omogočajo kontinuirno cementacijo posameznih obdelovancev po principu enega za drugim, na tekočem traku. Takšna linija za vakuumsko cementacijo proizvajalca Seco/Warwick je bila predstavljena letos prvič na sejmu toplotne obdelave Thermprocess v Düsseldorfu v Nemčiji (**slika 4c**).



Slika 4: (a) Šaržna enokomorna peč za vakuumsko cementacijo proizvajalca Ipsen International [26] (b) šaržna večkomorna modularna zasnova peči ter (c) kontinuirna zasnova peči za vakuumsko cementacijo proizvajalca Seco/Warwick [27]

Prednost takšne zasnove peči je v še večji ponovljivosti rezultatov, kar posledično vodi k zmanjšanju izmeta ter večji ekonomičnosti in okoljski sprejemljivosti procesa.

Sedaj je mogoče z današnjo tehnologijo cementirati v vakuumu obdelovance velikosti 600 mm × 600 mm × 900 mm in mase nad 300 kg z visoko enakostjo trdote površine, globine cementirane plasti in koncentracijskega gradienta ogljika v njej. V praksi je

največji izziv zagotoviti homogeno in ponovljivo obdelavo čim večjega števila večjih, gosto zloženih obdelovancev. Višje temperature cementacije omogočajo skrajšanje celotnega procesnega časa [2,3].

3.1 Plini za vakuumsko cementacijo

a) Metan

Kot prvi plin za cementacijo v vakuumu se je uporabljal metan kot logična izbira, saj je najcenejši, splošno dosegljiv in se že leta uporablja za klasično plinsko cementacijo. Metan je reaktiven, če se uporablja v kombinaciji s CO, CO₂, H₂, vodno paro in drugimi substituenti, ki se navadno uporabljajo v endotermnih atmosferah. Na drugi strani je metan kot samostojen plin zelo stabilen in nereaktiven tudi pri zelo visokih temperaturah. Zato je uporaba metana kot samostojnega plina pri vakuumski cementaciji mogoča le pri zelo visokem tlaku metana med 300 mbar in 500 mbar. Pri tako visokem tlaku je sicer ogljičenje uspešno, vendar pa se obenem tvori v peči tudi velika količina saj, ki zelo poveča obratovalne in vzdrževalne stroške procesa. Problem slabe reaktivnosti metana pri nizkem parcialnem tlaku se da rešiti z uporabo plazme, pri čemer z visoko enosmerno napetostjo 1000 V dosežemo ionizacijo metana in njegovo reaktivnost tudi pri parcialnem tlaku nižjem od 15 mbar brez tvorbe saj. Cementacija s plazmo se navadno uporablja za delno cementacijo še posebej slepih izvrtin.

b) Propan

Uporaba propana daje zelo dobre rezultate, še posebej pri tlaku med 25 mbar in 35 mbar, kjer je stopnja tvorbe saj zelo majhna.

c) Acetilen

Zaradi naštetih pomanjkljivosti nasičenih ogljikovodikov se je začela uporaba nenasičenih ogljikovodikov za vakuumsko cementacijo, kot sta acetilen in etilen. Zaradi dvojnih in trojnih nenasičenih vezi, ki so zelo šibke, so ti ogljikovodiki zelo reaktivni že pri sobni temperaturi. Vendar pa ima visoka stopnja reaktivnosti za posledico tvorbo saj, zato nasičene ogljikovodike uporabljamo v vakuumu pri izredno nizkem parcialnem tlaku (nekaj 10 mbar). Naslednja slabost nenasičenih ogljikovodikov je tvorba težjih komponent na mestih v peči, ki so vodno hlajena.

Prednosti vakuumske cementacije z acetilenom:

- bistveno zmanjšana poraba plina za cementacijo za dosego želene globine cementirane plasti in ustreznega koncentracijskega gradienta ogljika v njej;

- ni potrebno povišanje tlaka za cementacijo pri izdelkih kompliciranih oblik s slepimi izvrtinami z razmerjem l/d med 12–50;
- visoka stopnja učinkovitosti procesa – pri vakuumski cementaciji z acetilenom se učinkovito uporabi od 25 % do 35 % ogljika iz atmosfere za cementacijo; pri uporabi propana le od 5 % do 10 %, medtem ko je učinkovitost klasične plinske cementacije le 1 %;
- odlična enakomernost cementirane plasti ne glede na obliko obdelovanca;
- velika ponovljivost rezultatov procesa; dosega zelene mikrostrukture z optimalnimi in predvidljivimi lastnostmi;
- povečana produktivnost na račun zmanjšanje stroškov popravila peči zaradi zmanjšanja količine saj.

č) *Ciklični ogljikovodiki*

Dandanes prevladuje težnja po izbiri takšnega medija za cementacijo, ki ima visok potencial za cementacijo, toplotno stabilnost, odpornost proti tvorbi stranskih produktov, kot so saje in tar. V praksi se je izkazala uporaba cikličnih nasičenih ogljikovodikov s pet ali šest atomi ogljika (ciklopentan, cikloheksan). Ti ogljikovodiki se nahajajo v tekočem agregatnem stanju in niso plinasti pri sobni temperaturi. Imajo visoko toplotno stabilnost in razpadejo le v stiku z obdelovancem – potek katalitične reakcije z kovinami (platina, nikelj, redke zemlje, železo). Odlikujejo se z majhno stopnjo tvorbe saj na površini obdelovanca ter v komori peči. Plinasti ogljikovodik se v komoro peči dozira s posebnimi šobami, ki so del računalniško krmiljenega dozirnega sistema z odzivnostjo med 2 ms in 140 ms. Nadtlak v vbrizgalnem sistemu dosežemo z inertnim plinom (Ar, N₂). Prednost te metode je v doseganju zelo enovite cementirane plasti, ki ni odvisna od geometrijske kompleksnosti obdelovanca. Rezultati raziskave so pokazali minimalne odmike med globino cementirane plasti, merjeno v korenu in vrhu zoba z ujemanje globin > 90 %, medtem ko je povprečno ujemanje globin pri klasični plinski cementaciji pod 65 %.

3.1.1 *Učinkovitost plinov za cementacijo*

Metan (CH₄) – V temperaturnem območju 900–980 °C je termodinamično stabilen in deluje bolj kot inertni plin, saj se sprosti le 3 % ogljika. Za povečanje učinkovitosti metana kot plina za cementacijo, ga je treba stimulirati – ionizirati s plazmo pri napetosti 1000 V in gostoti toka pribl. 0,6 mA/cm². V tem primeru se pri razpadu metana v plazmi sprosti do 80 % ogljika.

Acetilen (C₂H₂) – V temperaturnem območju med 920 °C in 980 °C poteče disociacija acetilena, pri tem se sprosti do 80 % ogljika. Količina ogljika je v atmosferi peči vedno večja od maksimalne topnosti ogljika v obdelovancu, tako da pride do prenasíčenja površinskega sloja obdelovanca že v nekaj minutah izpostavljenosti atmosferi cementacije.

Propan (C₃H₈) – Pri disociaciji propana v temperaturnem območju med 920 °C in 980 °C se sprosti do 30 % ogljika.

3.2 *Kaljenje obdelovancev z uporabo plina pod visokim tlakom*

Na področju kaljenja hitroreznih jekel in vroče ter hladno preoblikovanih orodnih jekel se dandanes uporablja praktično samo še kaljenje z uporabo plinov pod visokim tlakom in je le-to popolnoma zamenjalo uporabo solnih in oljnih kopeli. Prav tako je dandanes mogoče kaliti večino jekel, namenjenih za cementacijo, s plini in plinskimi mešanici pri visokem tlaku. Gašenje s plinom odlikuje visoka ekonomska učinkovitost in prijaznost do okolja. Plina, kot sta helij ali dušik, sta popolnoma inertna in brez tveganja za okolico in ne pustita kemijskih produktov na površini vzorca ter na konstrukcijskih elementih peči. Tako ni treba investirati v dodatno opremo, kot so pralne linije ali sistemi za nadzor požarne varnosti. Ta dejstva tako bistveno vplivajo na zmanjšanje stroškov. V primeru uporabe helija kot plina za gašenje se zaradi njegove visoke cene uporablja sistem za reciklažo helija in njegovo ponovno uporabo. V praksi se uporabljajo številni plini za gašenje, kot so: Ar, N₂, He, H₂, pri čemer dosežemo največji efekt gašenja z vodikom, najmanjšega pa z argonom. Neodvisno od vrste plina narašča intenzivnost hlajenja z naraščanjem tlaka gašenja in naraščanjem hitrosti plina.

Obstaja velika razlika pri prenosu toplote iz obdelovanca v medij kaljenja. Pri kaljenju v vodi ali olju je obdelovanec izpostavljen številnim fazam, ki se odvijajo med kaljenjem v tekočem mediju: (i) nastanek tanke plasti vrelega medija na površini obdelovanca, (ii) nastanek plasti mehurčkov medija za kaljenje na obdelovancu in (iii) hlajenje obdelovanca s konvekcijo. Vsaka od naštetih faz hlajenja ima svoj koeficient toplotne prevodnosti, kar ima za posledico nastanek temperaturnih gradientov v obdelovancu. Posledica tega je neenakomerno ohlajanje obdelovanca in pojav njegove dimenzijske in geometrijske izkrivljenosti. Na drugi strani med uporabo plina za kaljenje ne pride do spremembe njegovega agregatnega stanja, zato je prenos toplote v obdelovancu homogen, kar se odlikuje v večji dimenzijski stabilnosti obdelovancev.

Prednosti kaljenja s plini proti kaljenju v olju ali vodi:

- obdelovanci so čisti in suhi po kaljenju;
- ni potrebe po pralnih strojih ter ni onesnaževanja vode;
- ni potrebe po popravljenih kompliciranih pralnih linij in ni potrebe po čistilnih linijah za čiščenje vode, uporabljene za pranje obdelovancev;
- peči za vakuumsko cementacijo tako zasedejo bistveno manj prostora v primerjavi s konvencionalnimi linijami;
- bistveno zmanjšanje stroškov;
- intenzivnost kaljenja kontroliramo z regulacijo velikosti tlaka plina;
- ni potrebnih zaščitnih pregrad za nastalo oljno oz. vodno paro;
- zmanjšano tveganje obdelovancev.

4 PREDNOSTI VAKUUMSKE CEMENTACIJE PRED KLASIČNO PLINSKO

Vakuumsko cementacija ima številne prednosti pred klasično plinsko cementacijo. Površina izdelkov je čistejša kot pri plinski cementaciji. Zaradi boljšega nadzora procesa so odmiki med obdelovanci manjši. Vakuumsko cementacijske peči so čistejše in okolju ter ljudem prijaznejše od plinskih [1–13]. Zaradi gladke in čiste površine obdelovancev po vakuumski cementaciji površine obdelovancev ni več treba dodatno čistiti ali celo mehansko obdelovati. Zaradi poteka procesa v vakuumu in uporabe plinov, ki ne vsebujejo kisika, ni oksidacije površine obdelovancev ter ni pojava oksidacije po mejah zrn. Poraba plinov za cementacijo je bistveno manjša kot pri klasični plinski – nekaj dm^3/h proti m^3/h .

Vakuumsko cementacijo odlikujejo še naslednje prednosti pred klasično plinsko [2, 3, 24]:

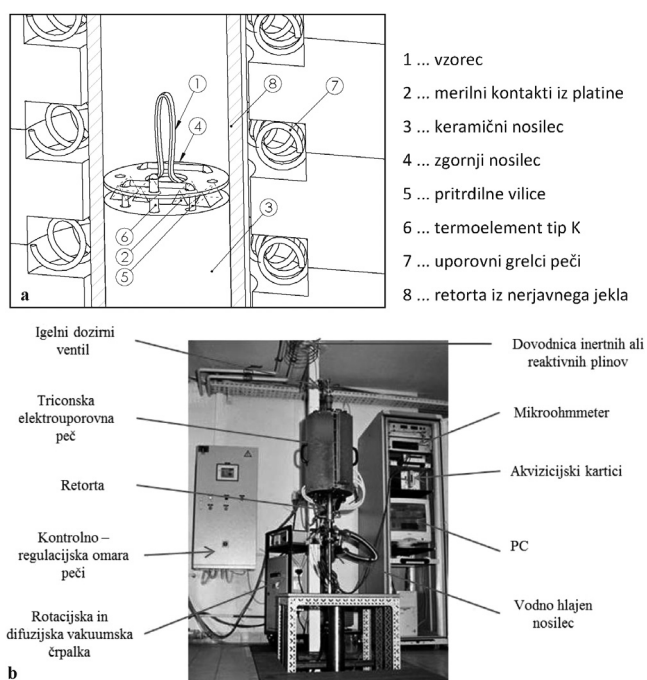
- visoka ponovljivost rezultatov procesa pri globinah cementirane plasti od 0,1 mm do 5 mm;
- krajši časi za doseg želene globine cementirane plasti v primerjavi s klasično plinsko cementacijo;
- doseg enakomerne globine cementirane plasti;
- enostavnost cementacije obdelovancev kompliciranih oblik z ozkimi in/ali slepimi odprtini;
- enostaven nadzor globine cementirane plasti;
- ni potrebna uporaba izpušnih sistemov za nastale pline pri cementaciji; prav tako ni potrebna uporaba »ognjene zavese« za odgor vnetljivih izpušnih plinov;
- višje temperature cementacije omogočajo skrajšanje celotnega procesnega časa;
- manjše emisije CO_2 .

5 RAZVOJ METODE ZA SPROTNO SPREMLJANJE VAKUUMSKE CEMENTACIJE

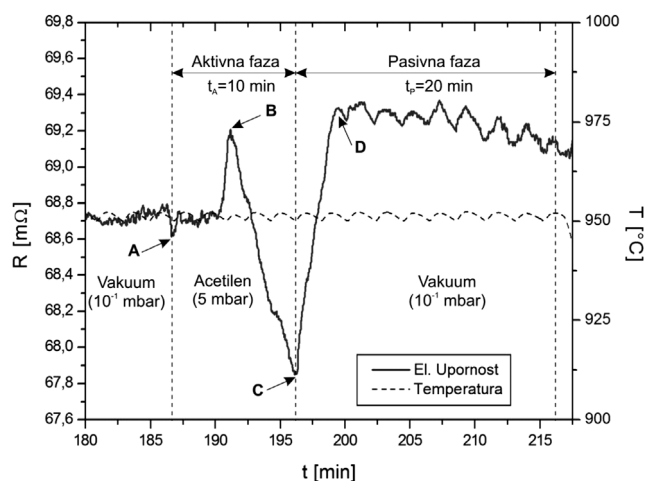
Na Fakulteti za strojinštvo, Inštitutu za tehnologijo materialov, se ukvarjamo z razvojem metode, ki bi omogočala sprotno in neporošno spremljanje cementacije. Razvijamo merilno celico, ki omogoča spremljanje globine naogljicene plasti med vakuumsko cementacijo (slika 5). Metoda spremljanja procesa vakuumsko cementacije temelji na osnovi sprotnih meritev spremembe električne upornosti v preizkušancu med aktivno in pasivno fazo.

Med ogličenjem se zaradi obogatitve vrhnjega sloja z ogljikom močno spreminja tudi specifična električna upornost vzorca. Električna upornost je med najbolj strukturno občutljivimi lastnostmi kovinskih materialov. S spremembo mikrostrukture, ki je med drugim tudi odvisna od vsake kemijske reakcije ter fazne transformacije, se v materialu spremeni število, vrsta ali koncentracija napak v kristalni mreži (prazna mesta, vrinjeni atomi, dislokacije, meje zrn ...). Vse te napake povzročajo oviranje ter sipanje elektronov, ki se gibljejo skozi snov zaradi zunanega električnega polja in tako vplivajo na spremembo električne upornosti snovi [28].

Na diagramu na sliki 6 je prikazana sprememba električne upornosti med vakuumsko cementacijo maloogljicnega jekla pri temperaturi $950\text{ }^\circ\text{C}$ in parcialnem tlaku acetilena 5 mbar. Ogličenje je bilo izvedeno z eno aktivno ($t_A = 10\text{ min}$) in pasivno fazo ($t_P = 20\text{ min}$). Z diagrama je razvidno, da je iz krivulje spremembe električne upornosti mogoče jasno



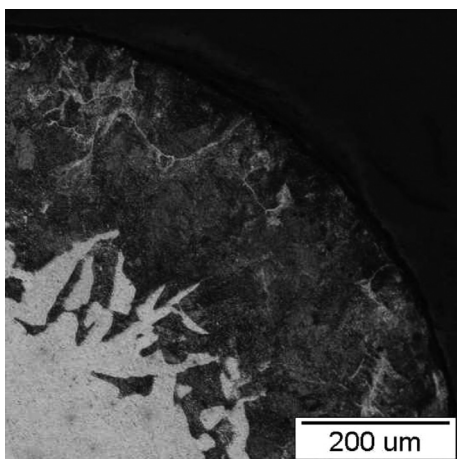
Slika 5: Merilna celica (a) in laboratorijska vakuumsko peč (b) za sprotno spremljanje vakuumsko cementacije jekel



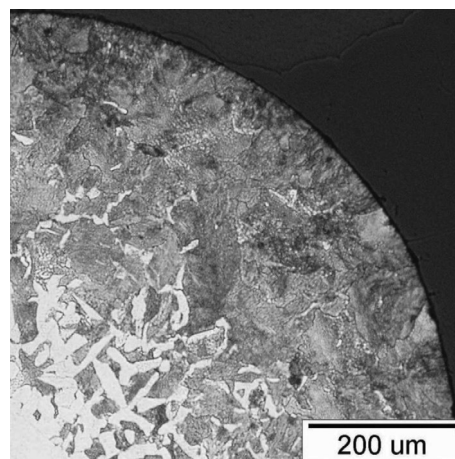
Slika 6: Spremljanje vakuumske cementacije s sprotnimi meritvami spremembe električne upornosti

razlikovati aktivno fazo od pasivne. Med aktivno fazo električna upornost narašča zaradi raztapljanja ogljika v kristalni rešetki avstenita, vse dokler ne dosežemo prenasičenosti avstenita z ogljikom in izločanja cementita. Izločanje cementita je povezano s padcem električne upornosti. Po končani aktivni fazi je koncentracija ogljika na površini obdelovanca bistveno večja od 0,8 %, kar je razvidno iz prisotnosti sekundarnega cementita, izločenega na mejah perlitnih zrn (sliki 7).

V pasivni fazi je pojav ravno nasproten. Med nadaljevanjem žarjenja preizkušanca v vakuumu sledi razpad cementitne plasti, kar ima za posledico povečanje električne upornosti. Na mikrosnetku na sliki 8 je razvidno, da je naogljíčena cona preizkušanca po končani pasivni fazi sestavljena le iz zunanje perlitne in notranje perlitnoferitne plasti, medtem ko je sredica preizkušanca še vedno sestavljena samo iz feritnih zrn. Po mejah perlitnih zrn ni opaziti izločanja sekundarnega cementita, iz česar



Slika 7: Mikrostruktura naogljíčene plasti po aktivni fazi ($t_A = 10$ min, $T = 950$ $^{\circ}C$, $p(C_2H_2) = 5$ mbar)



Slika 8: Mikrostruktura noogljíčene plasti po aktivni in pasivni fazi ($t_A = 10$ min, $t_P = 20$ min, $T = 950$ $^{\circ}C$, $p(C_2H_2) = 5$ mbar)

lahko sklepamo, da je koncentracija ogljika v površinski plasti približno 0,8 % .

6 SKLEP

Vakuumska cementacija je dandanes že na številnih področjih izpodrinila klasično plinsko zaradi boljše ponovljivosti, krajših procesnih časov ter okoljske sprejemljivosti. Ocenjuje se, da bo v prihodnjih desetih letih delež vakuumsko cementiranih proizvodov zrasel iz današnjih 10–15 % na 40 % celotnega trga cementiranih produktov.

Opravljenе raziskave na področju razvoja merilne metode za sprotno spremljanje procesa vakuumske cementacije potrjujejo, da nova merilna metoda omogoča kvalitativen in kvantitativen vpogled v pojave, ki se med vakuumsko cementacijo odvijajo v obdelovancu. Z zasnovano merilno metodo je mogoče neporušno in sprotno določiti globino cementirane plasti oziroma optimizirati čas trajanja aktivne in pasivne faze za dosego želene globine cementirane plasti. Namen razvoja metode je dobiti globlji vpogled v dogajanje v fazi adsorpcije, raztapljanja in difuzije atomov ogljika v površinskem sloju obdelovanca. Ta spoznanja bodo dobrodošla za (i) izboljšanje modelov spremljanja kinetike procesa vakuumske cementacije, ki so osnova računalniških simulacijskih programov, s katerimi so opremljene vakuumske peči za cementacijo oz. (ii) omogočila razvoj direktne metode spremljanja procesa vakuumske cementacije v industrijskem okolju.

7 LITERATURA

- [1] Heat Treatments, ASM Handbook, vol 4, ASM International, USA, 2007, 348
- [2] I. Hitoshi, IHI Engineering Review, 38 (2005) 2, 83–88
- [3] S. Bruce, V. Cheetham, Low-Pressure Carburising Systems: A Review of Current Technology, Proceedings – 15th IFHTSE and SMT20, Vienna, Austria, Sept 25–29, 2006

- [4] A. Goldsteinas, *Industrial Heating*, 74 (2007) 5, 71–76
- [5] W. Gräfen, M. Hornung, O. Irretier, M. Rink, *HTM - Haererei-Technische Mitteilungen*, 62 (2007) 3, 97–102
- [6] D. H. Herring, F. J. Otto, *Advanced Materials and Processes*, 165 (2007) 3, 31–33
- [7] S. Carey, D. Herring, *Heat Treating Progress*, 7 (2007) 3, 43–46
- [8] R. Poor, *Industrial Heating*, 74 (2007) 1, 43–47
- [9] L.-H. Chiu, Y.-J. Chen, C.-H. Wu, H. Chang, *Solid State Phenomena*, 118 (2006), 91–96
- [10] V. M. Osterman, *Industrial Heating*, 72 (2005) 9, 95–99
- [11] F. J. Otto, D. H. Herring, *Heat Treating Progress*, 5 (2005) 1, 133–137
- [12] J. Kowalewski, A. Wiechczyfski, *Industrial Heating*, 73 (2006) 1, 39–42
- [13] P. Kula, R. Pietrasik, K. Dybowski, *Journal of Mat. Proc. Tech.*, 164–165 (2005), 876–881
- [14] W. Gräfen, O. Irretier, M. Rink, *HTM - Haererei-Technische Mitteilungen*, 62 (2007) 2, 71–76
- [15] R. U. Khan, S. Bajohr, D. Buchholz, R. Reimert, H. D. Minh, K. Norinaga, V. M. Janardhanan, O. Deutschmann, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81 (2008) 2, 148–156
- [16] R. U. Khan, S. Bajohr, F. Graf, R. Reimert, *Molecules*, 12 (2007) 3, 290–296
- [17] M. Okumiya, S. Hagi, K. Orita, Y. Tsunekawa, Y. Umeda, T. Nagai, *Diffusion and Defect Data Pt. B: Solid State Phenomena*, 118 (2006), 97–102
- [18] W. Gräfen, B. Edenhofer, *Heat. Treat. Met.*, 26 (1999) 4, 79–85
- [19] H. Altena, F. Schrank, S. Heineck, B. Haase, F. Hoffmann, F. Graf, D. Liedtke, S. Bajohr, *HTM - Haererei-Technische Mitteilungen*, 61 (2006) 4, 195–206
- [20] T. Morita, T. Hanyuda, *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 92 (2006) 4, 268–273
- [21] M. Sugiyama, K. Ishikawa, H. Iwata, Using acetylene for superior performance vacuum carburizing, *Proceedings of the 18th Conference on Heat Treatment*, Oct. 12–15, 1998, 49–56
- [22] N. M. Ryzhov, A. E. Smirnov, R. S. Fakhurtdinov, *Metal Science and Heat Treatment*, 46 (2004) 7–8, 340–344
- [23] N. M. Ryzhov, A. E. Smirnov, R. S. Fakhurtdinov, L. M. Mulyakaev, V. I. Gromov, *Metal Science and Heat Treatment*, 46 (2004), 5–6, 230–236
- [24] Z. Gawronski, B. Kruszynski, P. Kula, *Journal of Mat. Proc. Tech.*, 159 (2005), 249–256
- [25] A. Stich, H. M. Tensi, *HTM Harterei-Techn. Mitt.*, 50 (1995), 31–35
- [26] Ipsen International, Inc, An Update on Low Pressure Carburizing Techniques and Experiences (zadnjič dostopano 8. 2. 2008), www.ipsenusa.com
- [27] Seco-Warwick, Precision case hardening for high volume manufacturing (zadnjič dostopano 10. 3. 2016), www.secowarwick.com
- [28] K. Schröder, *CRC Handbook of Electrical Resistivities of Binary Metallic Alloys*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1988

CELIČNI KOVINSKI MATERIALI

Branko Nečemer, Franc Zupanič, Zoran Ren

STROKOVNI ČLANEK

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

POVZETEK

Celični kovinski materiali se zaradi svojih ugodnih kombinacij mehanskih in fizikalnih lastnosti vse pogosteje uporabljajo v sodobni tehnični praksi. Zaradi porozne celične strukture je ena od njihovih glavnih prednosti sorazmerno majhna masa ob dokaj veliki nosilnosti. V splošnem delimo porozne celične materiale na odprto- in zaprtocelične, ki se med seboj razlikujejo po načinu izdelave. Celični materiali se uporabljajo v različnih industrijskih panogah, kot so avtomobilska, letalska, ladjedelniška industrija za povečanje togosti votlih strojnih delov, absorpcijo mehanske energije, polnilo filtrov ipd. V tem prispevku so na kratko predstavljene tudi celični avksetični materiali, ki imajo negativno vrednost Poissonovega razmerja.

Ključne besede: celični kovinski materiali, odprtocelična struktura, zaprtocelična struktura, avksentični materiali

Porous metal materials

ABSTRACT

Cellular metallic materials have been increasingly used in modern engineering practice due to their favourable combination of mechanical and physical properties. One of the main advantages of the cellular structure is a relatively low weight at significant stiffness. Cellular materials have open or closed cell structure, which differ in the manufacturing technology. Cellular materials are used in different industrial branches such as the automotive industry, aeronautical industry, nautical industry, where they are used to increase the stiffness of the hollow machine parts, for the absorption of the mechanical energy, for the filters, etc. A short presentation of the cellular auxetic materials with a negative Poisson's number is also given in this paper.

Keywords: cellular metal materials, open-cell structure, closed-cell structure, auxetic materials

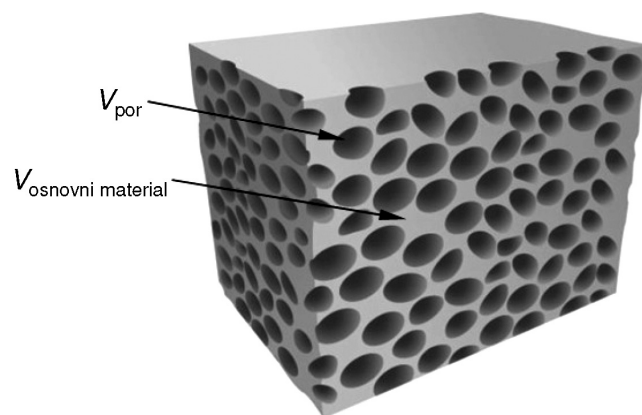
1 UVOD

Celični kovinski materiali se dandanes vse pogosteje uporabljajo v sodobni tehnični praksi. Celični materiali z visoko stopnjo poroznosti imajo ugodno kombinacijo mehanskih in fizikalnih lastnosti. Ti materiali sestojijo iz mreže povezanih volumenskih

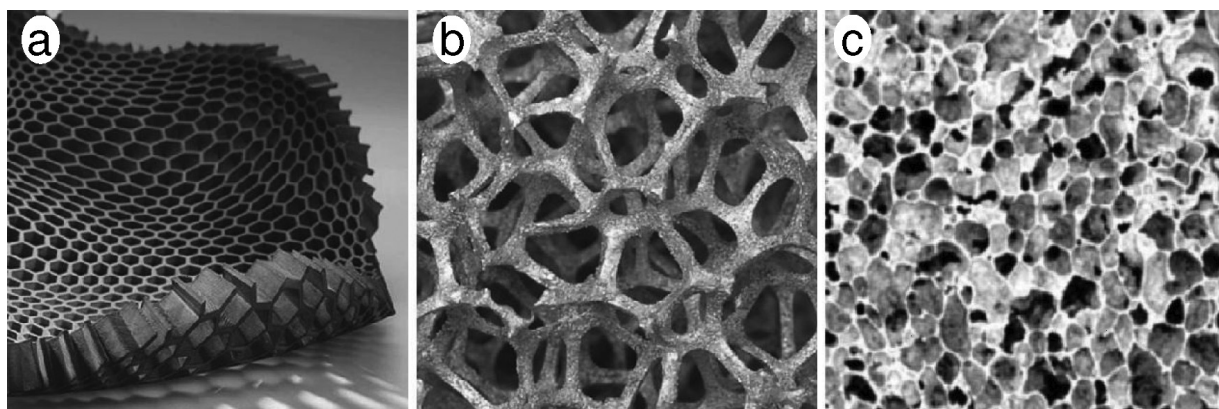
opornikov ali plošč. V splošnem ločimo tri glavne oblike celičnih struktur, ki so prikazane na **sliki 1**: (a) satovja, (b) odprte celice in (c) zaprte celice [3]. Najpomembnejša lastnost celičnih materialov je majhna relativna gostota in velika togost glede na specifično maso [1, 2]. Mehanske lastnosti celičnih materialov so odvisne od relativne gostote (enačba (1)) oziroma poroznosti (enačba (2)). Relativna gostota je definirana kot razmerje med gostoto celičnega materiala (ρ^*) in gostoto osnovnega materiala (ρ_s). Poroznost pa je definirana kot razmerje med volumnom por (V_{por}) in volumnom materiala ($V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}$) (**slika 2**). Uporabna relativna gostota celičnega poroznega materiala je v območju od 0,001 do 0,3 [17].

$$\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{V_{\text{osnovni material}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}} \quad (1)$$

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{V_{\text{por}}}{V_{\text{por}} + V_{\text{osnovni material}}} \quad (2)$$



Slika 2: Celični porozni material



Slika 1: Tri glavne vrste celičnih poroznih materialov so: (a) satovje, (b) odprte celice in (c) zaprte celice [1].

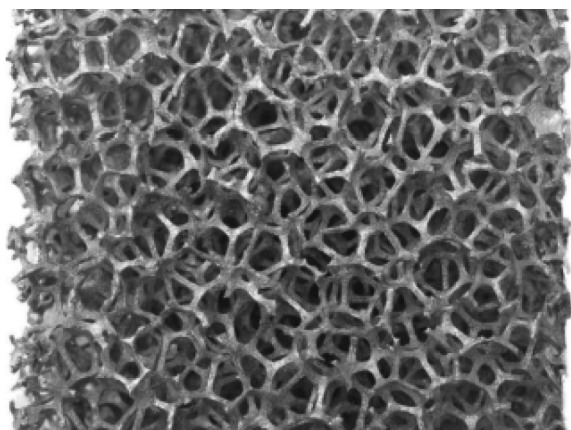
Celične porozne materiale delimo po strukturi v dve skupini: odprto- in zaprtocelične strukture. Pomembni lastnosti celičnih poroznih struktur sta tudi geometrija in topologija (pravilne in nepravilne oblike celic). Odprtocelični materiali dosegajo relativne gostote od 0,1 do 0,3, zaprtocelični pa od 0,001 do 0,13. Odprtocelične materiale z relativno gostoto $\rho^*/\rho_s < 0,1$ imenujemo tudi pene.

Prednosti celičnih poroznih materialov so lahke strukture, visoka zvočna izolativnost, dušilnost, visoka absorpcija mehanske energije, trajnost ob dinamični obremenitvi in reciklaži ipd. Industrijskim celičnim materialom lahko prilagodimo lastnosti z ustrezno kombinacijo parametrov in ustreznih postopkov izdelave za doseganje želenih mehanskih (trdnost, togost) in termičnih lastnosti (toplotna prevodnost) za uporabo v različne namene. Najpogostejši načini izdelave celičnih poroznih kovin so kontinuirano litje s penjenjem, sintranje prahov, filtracija in enosmerno vlihanje staljene kovine, lepljenje tankih folij ter eksplozijsko varjenje.

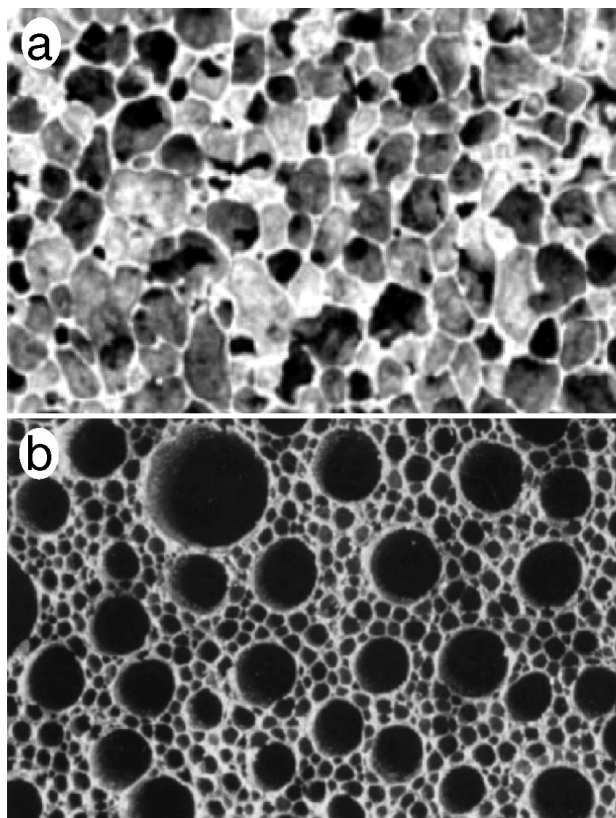
2 IZDELAVA CELIČNIH MATERIALOV

Izdelava odprtoceličnih materialov temelji na metodi repliciranja strukture osnovne polimerne pene, katere struktura se rabi kot negativ končne oblike kovinske celične strukture (slika 3). Postopek repliciranja lahko vključuje prekrivanje osnove s kovinsko paro, prekrivanje osnove z galvanotehniko (tehnika nanašanja kovinskih prevlek z elektrolizo) ali z litjem z iztaljenim jedrom [17]. Končni proizvod je celična kovina, katere struktura je enaka negativni strukturi polimerne pene. Oblika celične kovine ni odvisna od fizike penjenja kovinske osnove.

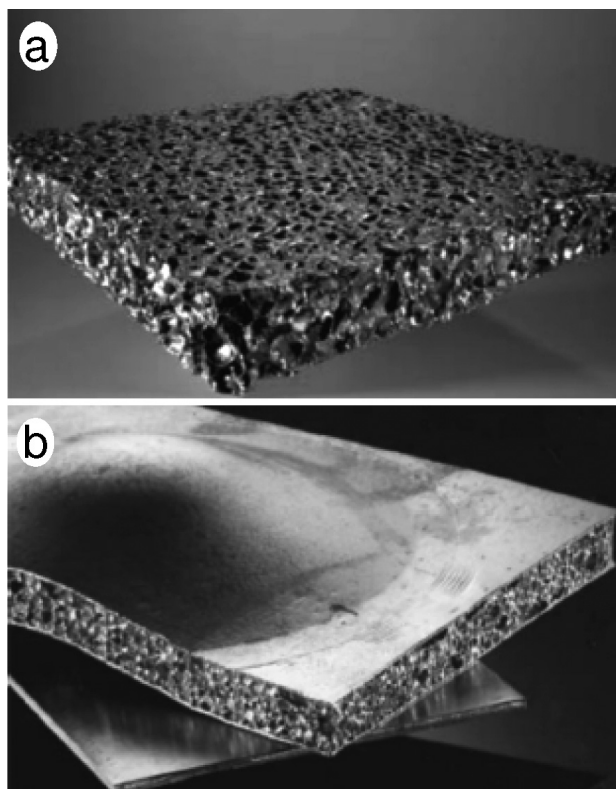
Pri izdelavi zaprtoceličnega materiala (slika 4) izrabljamo sam proces penjenja tekoče kovinske faze. Pri izdelavi zaprtoceličnega materiala lahko uporabimo različne metode, kot so na primer Cymat/Alcan



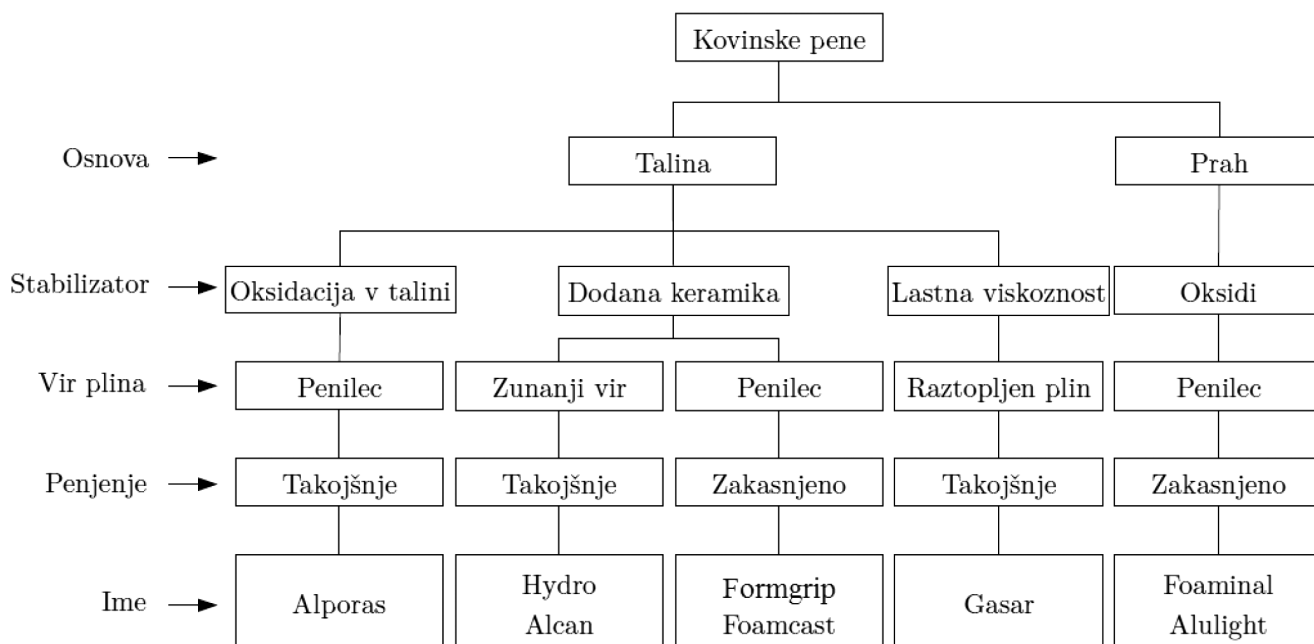
Slika 3: Kovinska pena, izdelana z metodo litja z izparljivim jedrom (Duocel)



Slika 4: Kovinska pena, izdelana s penjenjem ingota, ki vsebuje predhodno dodan penilec – Foamgrip (a), in pena, izdelana z eutektičnim strjevanjem kovinske taline – Gasar (b)



Slika 5: Kovinska pena, izdelana s vpihovanjem plina v aluminijevo talino – Cymat (a), in pena, proizvedena s penjenjem aluminijevega prahu med dvema jeklenima ploščama – Alulight (b)

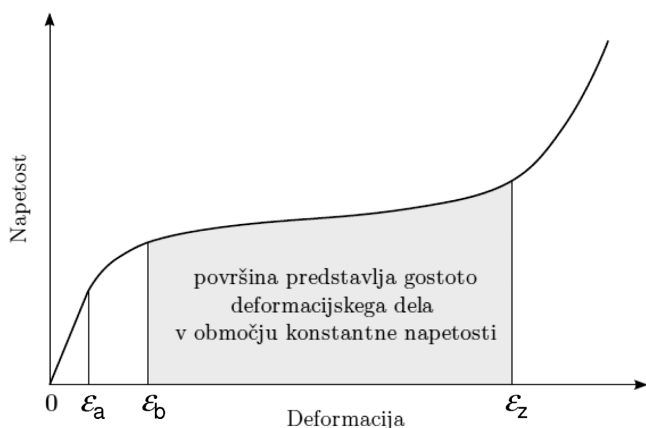


Slika 6: Izdelava zaprtoceličnih pen

(slika 5). Na sliki 6 je prikazana metoda Alporas, ki se prav tako uporablja za izdelavo zaprtoceličnega materiala. Glavni razliki sta v izbiri kovinske taline ali kovinskega prahu ter v izbiri vira plina, pri katerem lahko uporabimo zunanji vir plina, penilec (nastane ob razgradnji v talini) ali pa raztopljen plin. Med razlike posameznih metod spada čas začetka oz. sprožitve penjenja, ki je lahko takojšnja ali zakasnjena.

3 MEHANSKE LASTNOSTI CELIČNIH MATERIALOV

Celični materiali imajo pri tlačnih obremenitvah značilno razmerje napetost – specifična deformacija (slika 7), ki ga je mogoče razdeliti na štiri glavna območja:



Slika 7: Značilno razmerje napetosti celičnih materialov v odvisnosti od specifične deformacije pri tlačnih obremenitvah

- $(0-\varepsilon_a)$ elastični del: osnovni material celične strukture se deformira elastično in se po razbremenitvi vrne v začetno nedeformirano obliko;
- $(\varepsilon_a-\varepsilon_b)$ prehodni del v plastično območje: napetost v določenih točkah materiala celične strukture doseže napetost tečenja; posledično nastanejo na medceličnih stenah oziroma povezavah lokalna območja tečenja in prehod v plastično območje;
- $(\varepsilon_b-\varepsilon_z)$ konstantni del (konstantna napetost v plastičnem območju): po določeni specifični deformaciji doseže celični material nivo napetosti, ki je v zelo širokem območju specifičnih deformacij skoraj konstantna; v tem območju se pojavi uklon oziroma izrazita plastifikacija medceličnih sten in povezav; celični prostori se zmanjšujejo, relativna gostota pa posledično raste;
- $(\varepsilon_z<)$ povečanje togosti zaradi zgostitve celične strukture: po določeni stopnji specifične deformacije se medcelične stene in povezave začnejo sesedati, govorimo o zgostitvi materiala; togost oz. napetost v tem območju zelo hitro narašča, dokler deformirana celična struktura ne doseže togosti osnovnega materiala.

V tabeli 1 so navedene mehanske lastnosti nekaterih najpogostejših komercialnih celičnih materialov. Mehanske lastnosti, kot so napetost tečenja, modul elastičnosti, trdnost in količina absorbiranega dela, so odvisne tudi od relativne gostote, deformacijske hitrosti, uporabljenega polnila ter od oblikovnih parametrov celične strukture [17].

Tabela 1: Mehanske lastnosti kovinskih celičnih materialov [2]

Mehanska lastnost	Enota	Tržno ime celičnega materiala				
		Cymat	Alulight	Alporas	Duocel	Incofoam
Osnovni material		Al	Al	Al	Al	Ni
Relativna gostota	[%]	2,5–20,0	1,0–35,0	6,0–10,0	3,0–20,0	2,2–6,7
Poroznost	[%]	80–97,5	65–99	90–94	80–97	93,3–97,8
Struktura celic		zaprte	zaprte	zaprte	odprte	odprte
Modul elastičnosti	[GPa]	0,02–2,0	1,7–12	0,4–1,0	0,06–0,3	0,4–1,0
Strižni modul	[GPa]	0,001–1,0	0,6–5,2	0,3–0,35	0,02–0,1	0,17–0,37
Modul stisljivosti	[GPa]	0,02–3,2	1,8–13,0	0,9–1,2	0,06–0,3	0,4–1,0
Poissonovo število		0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,34	0,31–0,35	0,31–0,36
Meja plastičnosti	[MPa]	0,04–7,0	2,0–20,0	1,6–1,8	0,9–2,7	0,6–1,1
Tlačna trdnost	[MPa]	0,04–7,0	1,9–14,0	1,3–1,7	0,9–3,0	0,6–1,2
Natezna trdnost	[MPa]	0,05–8,5	2,2–30,0	1,6–1,9	1,9–3,5	1,0–2,4
Deformacija zgostitve ε_z		0,6–0,9	0,4–0,8	0,7–0,82	0,8–0,9	0,9–0,94

4 RAZVOJ IN UPORABNOST CELIČNIH KOVINSKIH MATERIALOV

Razvoj sodobnih celičnih kovinskih materialov, posebej kovinskih pen, je zelo pomemben, saj imajo celične kovine in zlitine kovin raznovrstne prednosti pred drugimi materiali, kot so: električna in toplotna prevodnost, velika trdnost ter velika toplotna obstojnost, majhna gostota (zelo lahke strukture), akustična izolativnost in dušilnost, hidrofobnost (majhna absorpcija vode), sposobnost absorpcije mehanskega dela z deformacijo, vzdržljivost pri dinamičnih obremenitvah, velika odpornost proti utrujanju, nevnjetljivost, možnost recikliranja in vedno bolj dostopne cene [4, 17].

Mikro- in makroskopske lastnosti celičnih kovinskih materialov so zelo privlačne za uporabo v številnih industrijskih panogah, kot so vesoljska, letalska, ladjedelniška, železniška in avtomobilska industrija. V avtomobilski industriji se celični kovinski materiali uporabljajo primarno kot elementi za absorbiranje velike količine mehanske energije s svojo deformacijo. Celični kovinski materiali se uporabljajo tudi v kompozitnih sendvičnih strukturah, ki so navadno sestavljene iz dveh »krovnih« plošč in vmesnega jedra, ki je iz celičnega materiala. Takšne sendvične strukture imajo večjo vlogo v različnih tehničnih aplikacijah zaradi visoke togosti, trdnosti in zmanjšane mase. V nekaterih primerih so posamezni celični elementi bistveni, saj so spojeni z uporabo različnih tehnologij, kot je sintranje, spajkanje in lepljenje. Slednje zagotavlja najbolj ekonomičen način spajanja in omogoča nadaljnje zmanjšanje stroškov in širitev potencialnih aplikacij [26].

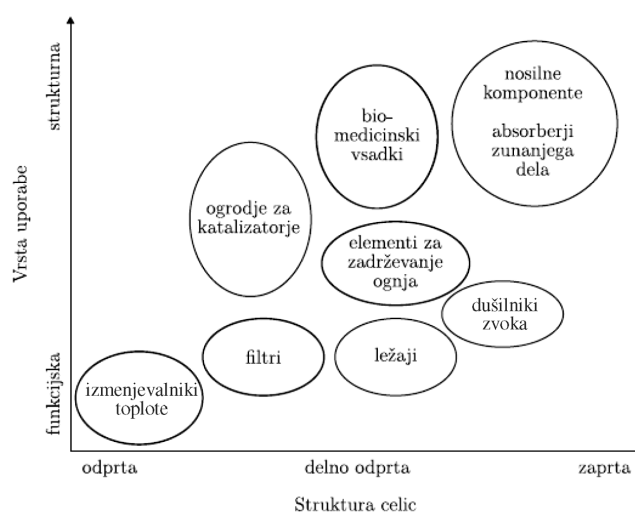
Celični materiali se uporabljajo tudi kot toplotni izmenjevalniki, filtri, ležaji, dušilniki zvoka, biomedicinski vsadki, kot elementi za zadrževanje ognja, kot ogrodja katalizatorjev in kot elementi za absorpcijo zunanjega mehanskega dela (**slika 8**). Elementi za absorpcijo dela se uporabljajo predvsem v vozilih, in

sicer na mestih deformacijskih con za izboljšanje pasivne varnosti v prometu. Togost elementov za izboljšanje pasivne varnosti je treba zelo previdno povečevati, da takšen element ohrani svojo varovalno funkcijo; ravno to omogočajo celični materiali. Porušitev celičnega materiala v tlačnem območju je namreč mogoče zelo dobro načrtovati z izbiro osnovnih lastnosti celičnega materiala, kot so vrsta osnovnega materiala, relativna gostota in velikost celic.

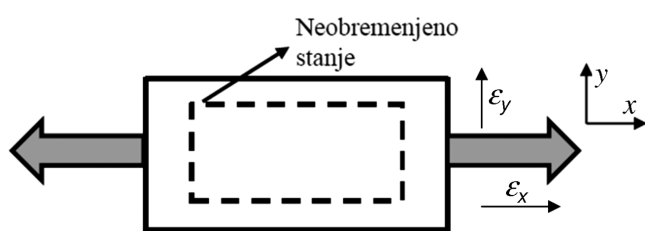
Pogosto so celični materiali uporabljeni tudi kot polnilo votlih konstrukcijskih delov in sestavnih oz. nosilnih elementov. Pri deformaciji takšnih delov se pojavi ugoden sinergijski učinek med komponentami, to je z votlim nosilcem in celičnim polnilom, kot je povečanje upogibne togosti, sprememba lastne frekvence nihanja, povečana dušilna sposobnost ipd.

5 AVKSETIČNI CELIČNI MATERIALI

Večina materialov ima pozitivno Poissonovo razmerje med prečno in vzdolžno deformacijo v razponu od 0 (porozni materiali, npr. pluta) do 0,5



Slika 8: Področja uporabe celičnih poroznih kovin glede na strukturo njihovih celic



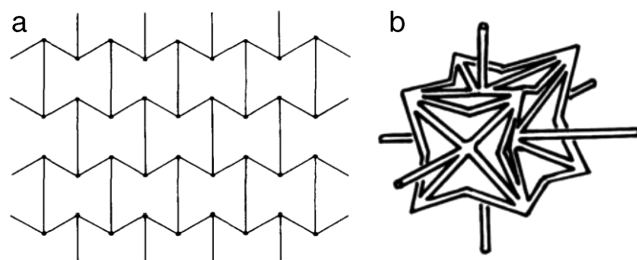
Slika 9: Shematični prikaz deformacije avksetičnih materialov ob natezni obremenitvi

(nestisljivi materiali, npr. guma) [19]. Obstajajo pa materiali oziroma materialne strukture z negativnim Poissonovim razmerjem, ki so znani kot »avksetični« materiali [19, 20]. Te materiale odlikuje bistveno povečanje/zmanjšanje njihovega volumna pri natezni/tlačni obremenitvi (**slika 9**) [5]. Avksetični materiali imajo zaradi svojih posebnih mehanskih lastnosti veliko potencialno uporabno vrednost v mnogih tehničnih aplikacijah. Vendar je njihova uporaba za zdaj še zelo redka, predvsem zaradi omejenega poznanja in zahtevnosti njihove izdelave.

Glede na poreklo lahko avksetične materiale razvrščamo na naravne in sintetične. Pri opazovanju mehanskih lastnosti naravnega avksetičnega materiala je veliko raziskovalcev dobilo navdih za iskanje osnovnih mehanizmov, ki povzročajo avksetično vedenje [18]. Te ugotovitve so bile uporabljene za oblikovanje sintetičnih materialov [18, 21]. V naravi avksetičnih materialov v makromerilu praktično ni, vendar pa obstajajo številni materiali, ki se vedejo avksetično v molekulskem merilu.

Prva obsežna raziskava na področju naravnih avksetičnih materialov je bila izvedena na silicijevem dioksidu (SiO_2), ki ima zelo podobno vedenje v primerjavi z avksetičnimi materiali. Silicijev dioksid ima zelo zanimivo vedenje in lastnosti pri visokih temperaturah in pritiskih. Znano je, da lahko SiO_2 obstaja v veliko različnih kristalnih oblikah, kot so kristobalit, tridimit, coesit, stishovite ... Te oblike (razen stishovit) so navadno tridimenzionalne mreže, zgrajene iz tetraedrov SiO_4^{4-} . Faze SiO_2 se rabijo kot modelni sistemi za študij visokotlačnih struktur, faznih prehodov in kemijskih vezi. Pri raziskavi so ugotovili, da ima analiziran material nasprotno od drugih silikatov negativno Poissonovo število (v odvisnosti od smeri obremenjevanja so vrednosti od +0,08 do -0,5) [8].

Negativno Poissonovo število imajo tudi nekateri zeoliti in že v letu 1928 analiziran pirolitski grafit [9]. Vsi preizkusi so bili do sedaj izvedeni na molekularni ravni, saj za zdaj še ni bilo mogoče izdelati materialov iz avksetičnih molekul in to vedenje prenesti na makroskopsko raven. Nekatero raziskavo [10] so sicer pokazale, da se lahko ob določenih deformacijah tudi koža vede kot avksetični material. Ob tem pa je treba

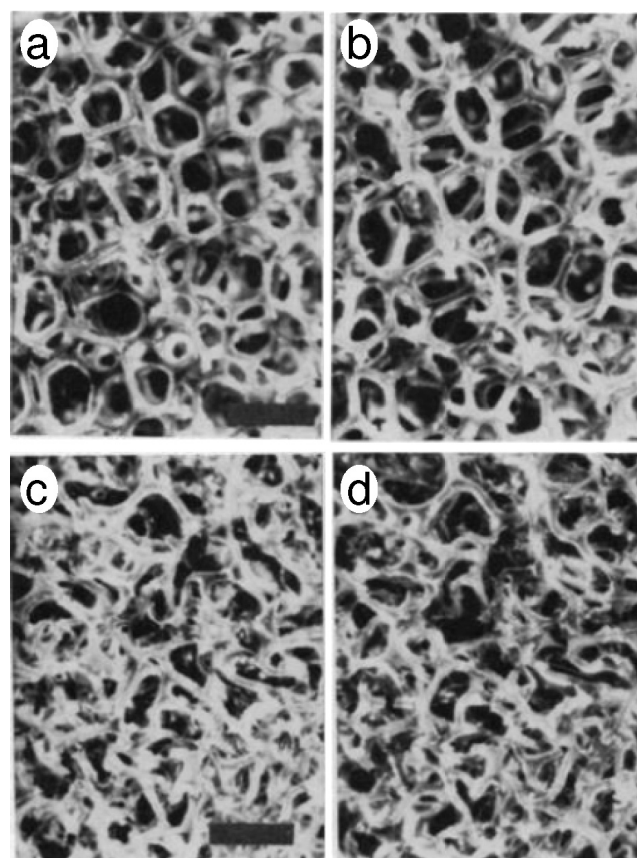


Slika 10: Idealizirana osnovna zgradba dvodimenzijske (a) in tridimenzijske (b) avksetične celične strukture [5]

poudariti, da je ob merjenju mehanskih lastnosti naravnih materialov zelo pomembno preučiti vpliv drugih dejavnikov na rezultate preizkusov, kot so na primer kemijske reakcije, vlažnost, temperatura ipd.

V zadnjih desetletjih je potekal razvoj avksetičnih metamaterialov.

Razvoj najpreprostejše realne 2D-strukture z avksetičnim vedenjem je prikazan na **sliki 10a** [5]. Leta 1987 so bili ustvarjeni prvi 3D sintetično narejeni porozni avksetični materiali, in sicer s preobrazbo osnovne celice konvencionalne odprto-celične pene, tako da so bile stene strukture upognjene proti notranjosti, kar je shematično prikazano na **sliki 10b** [5, 7]. Na mikroskopskih posnetkih strukture (**slika 5**) je lepo razvidno, da je zgradba avksetične strukture veliko



Slika 11: Primerjava strukture konvencionalne (a, b) in spremenjene konvencionalne v avksetično porozno strukturo (c, d) [7]

bolj zapletena kot zgradba konvencionalne pene, kar pomembno vpliva na anizotropnost materiala.

Preobrazba osnovne celice strukture je bila dosežena s kombinacijo obremenjevanja (triaksialno stiskanje) in segrevanja do temperature mehčanja osnovnega materiala celične strukture. Analiziranih je bilo več različnih poliestrskih pen in vse so po preobrazbi imele negativne vrednosti Poissonovega razmerja (srednja vrednost $-0,7$). V tej raziskavi so bile analizirane tudi kovinske pene, katerih geometrija osnovne celice je bila spremenjena s plastično deformacijo v treh med seboj pravokotnih smereh.

Sintetično ustvarjene avksetične materiale lahko razdelimo v tri glavne skupine:

- strukture, podobne satovju (slika 10a),
- pene (sliki 10b in 5),
- polimerne strukture (spodnja leva struktura na sliki 11c).

6 SKLEP

V prispevku so obravnavani celični kovinski materiali, na kratko pa so predstavljene tudi posebnosti avksetičnih celičnih materialov. Pri tem lahko na osnovi pregleda sodobne literature ugotovimo naslednje:

- Temeljna prednost celičnih materialov je njihova majhna relativna gostota ob visoki togosti, ki jo dosežemo z načrtovano poroznostjo materiala.
- S sodobnimi postopki lahko izdelamo različne vrste kovinskih celičnih struktur, ki imajo raznovrstne kombinacije lastnosti.
- Celični kovinski materiali se vse bolj uporabljajo v sodobni industriji. Eno izmed najpomembnejših področij za prihodnjo uporabo celičnih materialov je avtomobilska industrija, kjer se z uporabo celičnih materialov poveča sposobnost mehanske absorpcije energije z njihovo deformacijo, kar je ključnega pomena z vidika varnosti vozila.
- Najpogosteje so celični materiali uporabljeni za zapolnitev votlih avtomobilskih delov z namenom, da povečamo togost šasije vozila.
- Avksetični celični materiali z negativnim Poissonovim razmerjem so sorazmerno slabo raziskani, zaradi česar še niso širše praktično uporabni, kljub številnim potencialnim možnostim.

7 Literatura

- [1] J. Banhart, *Progress in Materials Science*, 46 (2001) 6, 559–632
- [2] A. Evans, J. Hutchinson, M. Ashby, *Progress in Materials Science*, 43 (1998) 3, 171–221
- [3] L. Gibson, M. Ashby, *Cellular solids: structure and properties – 2nd edition*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [4] M. Vesenjsek, Računalniško modeliranje celičnih struktur pod vplivom udarnih obremenitev, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2006
- [5] M. Mir, M. Najabat Ali, J. Sami, U. Ansari, Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures., *National University of Sciences and Technology (NUST), School of Mechanical and Manufacturing Engineering (SMME)*, Islamabad, 2014
- [6] K. Sieradzki, D. J. Green, L. J. Gibson, Mechanical properties of porous and cellular materials, *Materials Research Society*, Boston, 1991
- [7] R. S. Lakes, *Science*, 235 (1987) 4792, 1038–1040
- [8] A. Yeganeh-Haeri, D. J. Weidner, J. B. Parise, *Science*, 257 (1992) 5070, 650–652
- [9] W. Voigt, *Lehrbuch der Kristallphysik (mit Ausschluss der Kristalloptik)*, B. G. Teubner Leipzig, 1928
- [10] C. Lees, J. F. Vincent, J. E. Hillerton, *Biomed. Mater. Eng.*, 1 (1991) 1, 19–23
- [11] D. Papadopoulos, I. Konstantinidis, N. Papanastasiou, S. Skolianos, H. Lefakis, D. Tsipas, *Materials Letters*, 58 (2004) 21, 2574–2578
- [12] H. Fusheng, W. Jianning, C. Hefa, G. Junchang, *Journal of Materials Processing Technology*, 138 (2003) 1–3, 505–507
- [13] V. Shapovalov, *MRS Bulletin*, 19 (1994) 4, 24–29
- [14] M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. Wadley, *Metal foams: A design guide*, Elsevier Science, Burlington, 2000
- [15] Metal foam info, www.metalfoam.net, zadnjič dostopano 4. 4. 2015
- [16] T.-C. Lim, *Auxetic materials and structures*. Springer, 2015
- [17] M. Borovinšek, Računalniško modeliranje celičnih materialov neurejene strukture, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2009
- [18] Evans, K. E.; Alderson, A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking! *Adv. Mater.*, 12 (2000), 617–628
- [19] Lakes, R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 235 (1987), 1038–1040
- [20] Evans, K. E.; Nkansah, M. A.; Hutchinson, I. J.; Rogers, S. C. Molecular network design. *Nature*, 353 (1991), 124
- [21] Yang, W.; Li, Z. M.; Shi, W.; Xie, B. H.; Yang, M. B. Review on auxetic materials. *J. Mater. Sci.*, 39 (2004), 3269–3279
- [22] Critchley, R.; Corni, I.; Wharton, J. A.; Walsh, F. C.; Wood, R. J. K.; Stokes, K. R. A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. *Phys. Status Solidi B*, 250 (2013), 1963–1982
- [23] Shen, J.; Zhou, S.; Huang, X.; Xie, Y.M. Simple cubic three-dimensional auxetic metamaterials. *Phys. Status Solidi B*, 251 (2014), 1515–1522
- [24] Bertoldi, K.; Reis, P. M.; Willshaw, S.; Mullin, T. Negative Poisson's ratio behaviour induced by an elastic instability. *Adv. Mater.*, 22 (2010), 361–366
- [25] Mancusi, G.; Feo, L. A refined finite element formulation for the microstructure-dependent analysis of two-dimensional (2D) lattice materials. *Materials*, 6 (2013), 1–17
- [26] Vesenjsek M; Ren Z., *Metallic porous materials*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2015

PRVA FOTOGRAFIRANJA NADZVOČNIH IZSTRELKOV SINA GRAŠČAKA SPOD GORJANCEV (ob stoletnici smrti Ernsta Macha)

Stanislav Južnič

Univerza v Oklahomi, Oddelek za zgodovino znanosti, Norman, Oklahoma, ZDA; Arhiv Slovenske jezuitske province, Ljubljana

ZNANSTVENI ČLANEK

POVZETEK

Pred stoletjem umrli A. Ettingshausenov študent Ernst Mach je zasnoval prvo uporabo bliskovitega fotografiranja nadzvočnih izstrelkov, ki jo je za njega izpeljal K. Robidov, S. Šubicev in A. Toeplerjev študent Peter Salcher. Robida je bil pionir naprševanja kovin, Ettingshausen in Toepler pa sta razvijala sodobno znanstveno fotografiranje. Oba dosežka lahko povežemo s fotografiranjem zapletenih plazemskih turbulenc med naprševanjem tankih plasti z magnetronom.

Ključne besede: bliskovito fotografiranje, Ernst Mach, Peter Salcher, naprševanje, magnetron

First photography of ultrasonic projectiles (at 100 years anniversary of Ernst Mach' death)

ABSTRACT

A century ago Ernst Mach passed away. He was a student of Andreas baron Ettingshausen and designed the pioneering use of photography for ultrasonic projectiles. Peter Sacher, the student of K. Robida, S. Šubic and A. Toepler, made the measurement according to Mach's ideas. Robida was one of pioneers of cathode sputtering. Ettingshausen and Toepler developed the modern scientific photography. Both achievements can be related to make ultra-speed photographs of thin films sputtering with the magnetrons.

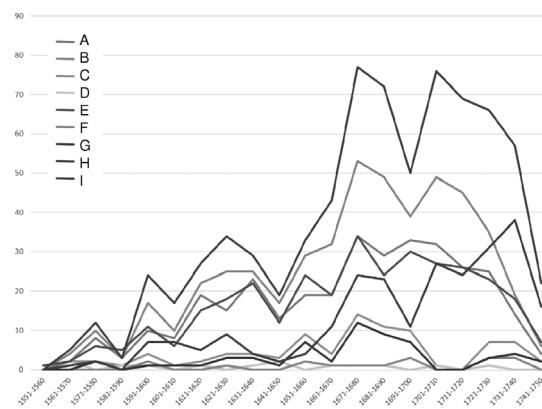
Keywords: high-speed camera, Ernst Mach, Peter Salcher, sputtering, magnetron

1 UVOD

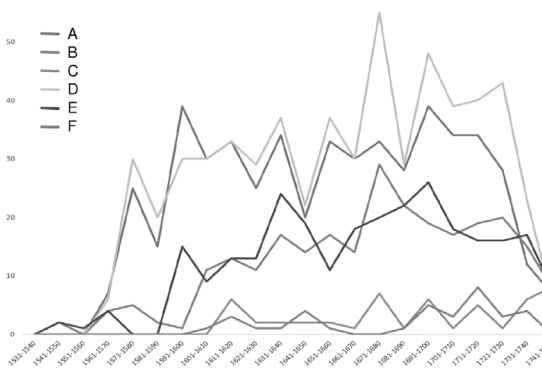
Tako naprševanje kovin kot bliskovita fotografija ultrazvočnih izstrelkov sta bili v svojih začetkih tesno povezani s Slovenci preko Stefanovega in Salcherjevega gimnazijskega profesorja razrednika Robide in Machovega očeta, veleposestnika v Velikem Slatniku med letoma 1858 in 1879. Združitev obeh dosežkov s sodobnim ultrahitrim snemanjem turbulenc plazme ob naprševanju z magnetronom morda znova obeta pomembno slovensko udeležbo, ki gradi na ramenih ljubljanske fizikalne srenje, kot se je začela razvijati pod jezuitsko taktirko pred tremi stoletji.

2 MACHOVI MED METULJI IZ VELIKEGA SLATNIKA

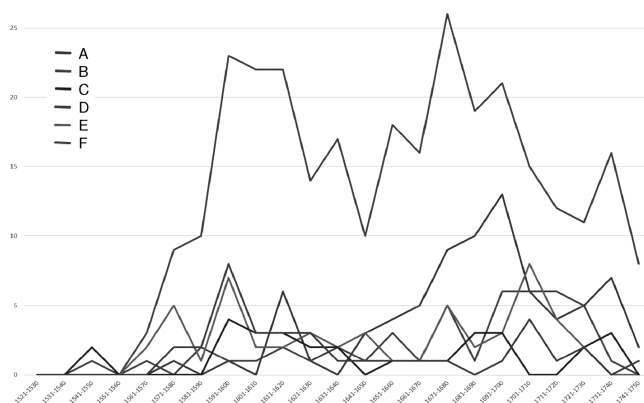
Pred 130 leti je januarja 1886 ugledni praški fizik Ernst Mach pisal deset let mlajšemu profesorju fizike z reške vojaške pomorske akademije Korošču Petru Salcherju. Dotlej se nista poznala, vendar je Ernst nujno potreboval Petrovo pomoč. V čem je bil problem, ki je krepko zaznamoval naš vsakdan? Zakaj je pacifist Mach potreboval dostop do reške tovarne



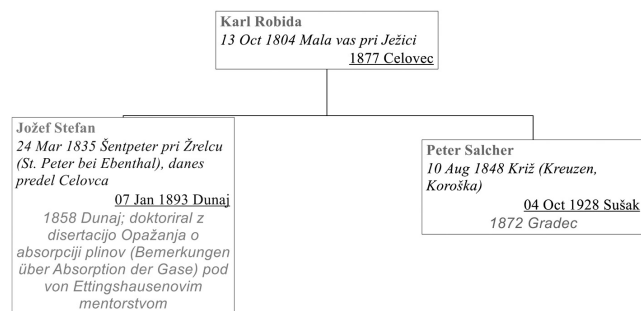
Slika 1: 1449 ljubljanskih jezuitov vključno s profesorji matematike in filozofije s fiziko kot profesorji ter njihovi spisi, razporejeni glede na leto rojstva avtorjev. A: prvih fizikalnih profesorov v letih od skupno 335, B: vseh fizikalnih profesorov v letih 1560–1750 od skupno 488 pod taktirko 264 profesorjev filozofije s fiziko ali matematike od skupno 1449 ljubljanskih jezuitov, C: število objav v tehniških vedah (matematika, fizika, astronomija) ljubljanskih jezuitov od skupno 100, D: astronomskih spisov od skupno 10, E: vseh spisov od skupno 330, F: matematičnih spisov od skupno 20, G: fizikalnih spisov od skupno 70, H: vseh matematičnih profesorov in repetitorjev (usposabljanj), razporejenih po letih rojstva nosilcev od skupno 251, I: fizikalnih in matematičnih profesorov ter repetitorjev po letih rojstva nosilcev od skupno 739.



Slika 2: 1449 jezuitov vključno s ljubljanskimi profesorji matematike in filozofije s fiziko kot študentov filozofije in teologije glede na leto rojstva. A: začetek študija filozofije v Gradcu od skupno 506 študentov med 1452 jezuiti, B: študij filozofije na Dunaju od skupno 259 bodočih ljubljanskih profesorjev matematike in filozofije s fiziko, C: študij filozofije v Trnavi od skupno 42 študentov med bodočimi ljubljanskimi jezuiti, tudi profesorji matematike in filozofije s fiziko, D: študij teologije v Gradcu od skupno 587 študentov med 1453 jezuiti, E: začetek študija teologije na Dunaju za skupno 1449 bodočih ljubljanskih jezuitov, med njimi številnih profesorjev matematike in filozofije s fiziko, F: študij teologije v Trnavi od skupno 35 bodočih ljubljanskih jezuitov, med njimi številnih profesorjev matematike in filozofije s fiziko.



Slika 3: Plemiči, misijonarji, »Slovenci in Hrvatje« med 1449 ljubljanskimi jezuiti. A: plemiči po letih rojstva od skupno 77, B: misijonarji po letih rojstva od skupno 45, C: 293 Kranjcev med 1449 ljubljanskimi jezuiti, razporejenimi po letih rojstva, D: 53 na hrvaškem rojenih jezuitov med 1452 ljubljanskimi jezuiti, razporejenimi po letih rojstva, E: 30 Spodnjih Štajercev med 1449 ljubljanskimi jezuiti, razporejenimi po letih rojstva, F: 37 Goričanov med 1449 ljubljanskimi jezuiti, razporejenimi po letih rojstva



Slika 4: Eden pionirjev naprševanja tankih kovinskih plasti, Karel Robida, z učencema Stefanom in Salcherjem

dve desetletji prej izumljenih torpedov, ki jih je svoj čas kot neetične skupaj s podmornicami v izvedbi Američana Roberta Fultona odklonil celo Napoleon?

Na prvi Mednarodni razstavi elektrike v Parizu oktobra leta 1881 je Mach, iščoč nove eksperimentalne izzive, nadvse pozorno poslušal predavanje stalnega svetovalca belgijske vojaške šole Louisa Henrija Friderika Melsensa (1814–1886) o razcefranih strelnih ranah ljudi in konj, še posebej akutnih pri žrtvah Francozov, ki so svojim žrtvam zavdali s tisti čas najhitrejšimi nadzvočnimi izstrelki. Melsens je predpostavil že leta 1872, takoj po Prusko-francoski vojni, da razdejanje v ranjenčevem tkivu povzroča stisnjeni zrak, ki ga izstrelki poriva pred seboj.

Seveda je Melsens izhajal zgolj iz pregledovanja delcev ubogih tarč in ne iz fotografskega pregleda dogajanja, ki mu tisti čas še ni bilo na voljo. Ernst pa je bil drugačne baže mož, saj se je že kot študent seznanil s fotografskimi postopki pri svojem učitelju

oficirskemu sinu Andreasu baronu Ettingshausenu, ki je svoj čas študiral na bombardirski dunajski šoli pri nasledniku, učencu prezgodaj preminulega Jurija barona Vege, stotniku Ignacu Lindnerju. Ettingshausen je uporabljal L. Daguerrrov (1787–1851) postopek in je leta 1840 prvi posnel fotografije skozi mikroskop, Ettingshausnov pomočnik pa je bil njegov zet, kristalograf Josef Grailich.

Mach je bil prevzet, tako da je vneto fotografiral v službi, predvsem pa med počitnicami pri svojih starših in treh mlajših sestrah v Velikem Slatniku pod Gorjanci, 5 km južno od Novega mesta. Najmlajša sestra Vilhelmina se je po materini smrti sicer nekoliko potepla s postavnim domačim hlapcem, kar je Janez Trdina spretno uporabil v svoji povesti Zakleti oreh. Med dolenskim počitnicami je Ernst pogosto snoval svoje poskuse, ki jih je nato s pridom kazal po vsem svetu. Marsikaj mu je sproti svetoval oče, domiselni slatniški »graščak«.

Johann Nepomuk Mach (1805–1879) je svoj čas študiral na Karlovi univerzi v Pragi in je vedoželjnega Ernsta v najstniških letih poučeval kar doma. Leta 1840 je Johann postal lastnik velike posesti v Untersiebenbrunn v Marchfeldu v Spodnji Avstriji med Dunajem in Bratislavo, tako da je zvedavi Ernst odraščal na podeželju. V času Ernstovega rojstva je bil Johann Mach v Brnu vzgojitelj otrok barona Bretona in Josephine, rojene Lanhaus,¹ pozneje pa je skrbel za znanje otrok poznejšega notranjega in šolskega ministra v prevratnih letih 1848–1849 Franza Serapha Stadion grofa Warthausen (1806–8. 6. 1853) in Kunigunde. Ded je bil Joseph Mach. Ded po materini strani, oče Ernstove matere Josephe Lanhaus, je bil Wenzl Lanhaus, ki je projektiral ceste, sam Ernst pa je študiral 3 leta in maturiral pri piaristih na nekdanji moravski nejezuitski gimnaziji Kreamsier (Kroměříž) pri učitelju naravoslovja Francu Ksaverju Wesselyju (Veselý, 1819 Rajnocovice–1904 Kroměříž), ki je v Kroměřížu predaval med letoma 1854 in 1881. Podrobno je opisal lokalne rastline² v dobi, ko je Machov starejši dunajski sošolec Gregor Mendel snoval svoje genetske zakone v avguštinskem samostanu nedaleč od Brna.

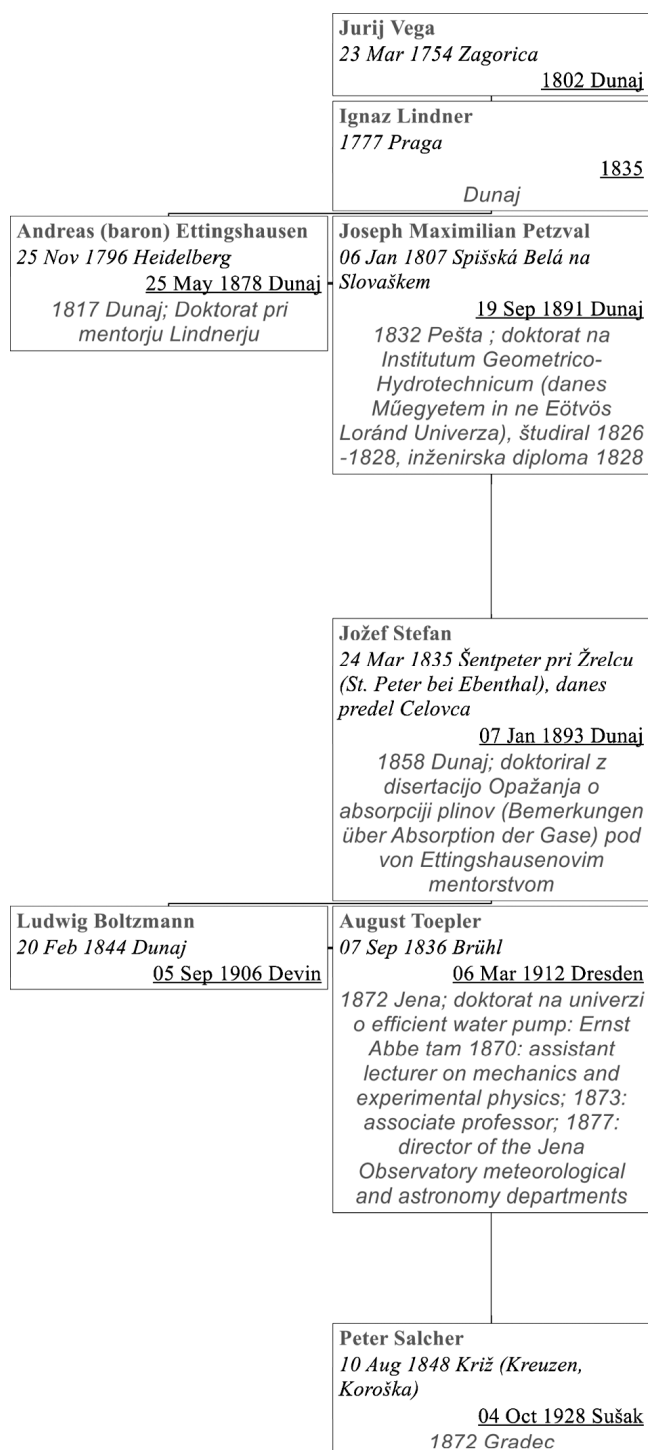
Kljub vsej spretnosti pa oče in sin Mach pod Gorjanci nikakor nista mogla rešiti eksperimentalne plati Melsensove balistike, saj se fotografiranje valovnega čela izstrelka v zraku nikakor ni hotelo posrečiti. Ernst je opravil številne poskuse tako v Slatniku kot v Pragi, a videlo se ni prav nič obetavnega na dragih fotografijah, ki jih je že v Ernstovih najstniških letih na Bledu dopolnjeval izumitelj Janez Puhar. Ernst je sumil, da so njegovi izstrelki pre-

¹ Carus, 1911, 22

² Carus, 1911, 24

počasni in ne dosegajo nadzvočne hitrosti. Svitilo se mu je namreč, da je prav visoka hitrost s prebojem zvočnega zidu odgovorna za strahovite rane hitrih francoskih izstrelkov in ne zgolj stisnjen zrak iz Melsensovih domnev.

Ernst in njegov oče sta večkrat premlevala okoliščine, saj je oče dobro poznal poldrugo leto starejšega praškega profesorja med letoma 1835 in 1847



Slika 5: Jurij Vega in njegovi akademski dediči vključno s Salcherjem

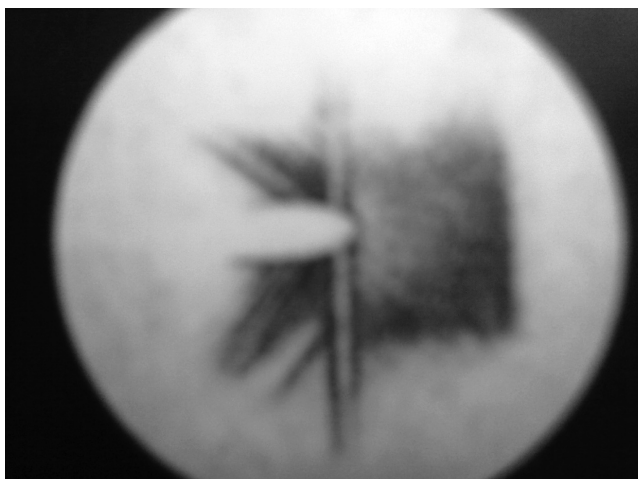
Christiana Dopplerja, ki je leta 1842 pred praško Kraljevo družbo predstavil znameniti Dopplerjev efekt, seveda znan pod tem imenom komaj pozneje. Ernst je po očetovem pripovedovanju sprejel domiselnega Dopplerja za svojega idola, čeprav je Doppler umrl prehitro, da bi Mach lahko študiral pri njem na Dunaju; tam je Dopplerja nadomestil Ettingshausen.

Ernst se seveda ni dal motiti in je leta 1859/60 v svojem prvem samostojnem delu po Ettingshausenovem nasvetu dokazal ravno Dopplerjevo teorijo spreminjanja frekvence zvoka in svetlobe gibljivih izstrelkov, ki ji je nasprotoval dunajski univerzitetni profesor matematike in strokovnjak za optiko, nekoliko samosvoj Madžar Josef Petzval. Leta 1873 je Ernst objavil knjigo o Dopplerjevih optično-akustičnih poskusih, s katero se je počeno oddolžil svojemu idolu za številne navdihe.

Obema Machoma je bilo kmalu jasno, da zagati z nadzvočno balistiko ne bosta prišla do dna brez sodelovanja vodilnih habsburških vojaških krogov, ki so edini imeli dostop do dovolj hitrih izstrelkov, svoje izsledke pa so pogosto držali v tajnosti. Potrebovala sta zveze z visokimi častniki in izbira je naravno padla na najbližje, saj so 75 km južneje v Reki leta 1853 začeli delo v pozneje imenovani *Torpedofabrik*, naslednje leto 1854 pa so ustanovili cesarsko kraljevo vojaško pomorsko akademijo. Reka je bila tradicionalno povezana s Kranjsko in v času Ernstovega deda celo formalno njen del, sedaj pa je urno napredovala kot pglavitna luka ogrske polovice monarhije, podrejena neposredno Budimpešti.

Na reški vojaško-pomorski akademiji je matematiko in hidrografijo predaval prežgodaj umrli dr. Albrecht Wenzel pl. Tegetthoff (1841 Gradec–22. 7. 1871), najmlajši brat vrhovnega poveljnika habsburške mornarice viceadmirala in zmagovalca pri Visu Mariborčana Wilhelma pl. Tegetthoffa (1827 Maribor–7. 4. 1871). Sin upokojenega pehotnega majorja Franza Karla Gabrijela (1790–1858), Albrecht, je študiral na plemiški Terezijanski akademiji na Dunajski filozofski fakulteti. Takoj po doktoratu je komaj štiriindvajsetleten objavil učbenik za računanje.

Ernstov mlajši prijatelj Gulio Peterin (Julije, Juluis, * 1846) je maturiral na reški gimnaziji leta 1854/55 in je nato, po končanem študiju, na reški vojaško-pomorski akademiji predaval navtiko od leta 1861 do leta 1893 ali celo 1897. Objavljal je pri dunajski akademiji tako kot sam Ernst Mach. Tako je pregnani Mach uporabil skupnega prijatelja reškega domačina Peterina za zvezo, da je lahko na profesorja fizike reške vojaško-pomorske akademije Petra Salcherja naslovil pismo s prošnjo za postavitev poskusov, primernih za fotografiranje nadzvočnih izstrelkov v novi reški tovarni torpedov.



Slika 6: Predzadnja med šestimi fotografijami, ki sta jih Mach in Salcher leta 1887 objavila pod naslovom *Photographische Fixierung der Projectile in der Luft* v glasilu dunajske akademije.

Peterinovo posredovanje je bilo ključno za sam začetek dela, če je Ernst hotel preveriti domneve pravkar umrlega balistika Melsensa o udarnem valu pred nadzvočnim izstrelkom. Ernst je imel idejo, Peter pa samo tedanjim vojaškim krogom prihranjene možnosti za eksperimentiranje. Ernst in Peter se namreč za čuda še nista osebno poznala: Ernst je nehal predavati na univerzi v Gradcu tik preden se je tja vpisal desetletje mlajši bruc Peter leta 1868/69. Na dunajski električni razstavi pod znanstveno-tehničkim vodstvom Jožefa Stefana sta svoje izume resda razstavljala v sosednjih paviljonih, vendar se tudi tedaj nista osebno srečala. Sedaj pa je bil čas, da zamudo popravita.

Čeprav tega takoj v prvem pismu 25. 1. 1886 ni poudaril, je Ernst seveda dobro vedel, da je njegove eksperimentalne zamisli mogoče izvesti zgolj v reški tovarni torpedov, ki sta jo leta 1875 kupila Anglež Robert Whitehead (1823–1905) in njegov zet; preimenovala sta jo v *Torpedofabrik Whitehead & Comp.* Leta 1878 so v tovarno prišli podpisovat pogodbe predstavniki vlad osemnajstih držav vključno s pedantnimi Japonci, leta 1881 pa so z Reke že izvažali torpede po vsem svetu. Leta 1889 so prvotni kaliber 356 mm povečali še na 381 mm, 450 mm in 533 mm in tako presegli polmetrsko limito. Leta 1892 pa so osnovali še podružnico v mestu Weymouth blizu Bostona v ZDA, da bi se izognili ameriškim uvoznim dajatvam.

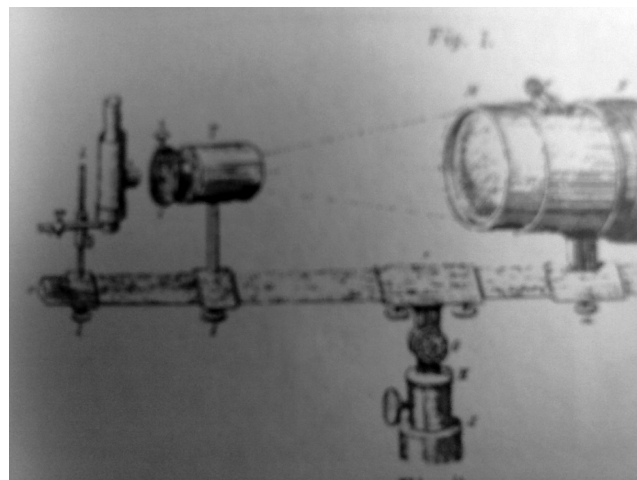
Ernstovemu očetu s slatniškega gradu pod Gorjanci napredek tovarne v bližnji Reki seveda ni ostal skrit, zato je sinu svetoval, naj se poveže z reškimi vojaškimi strokovnjaki. Oče Johann je žal kot vdovec v Velikem Slatniku preminil že konec leta 1879 in tako ni dočakal sinovih nadzvočnih balističnih uspehov. V

Velikem Slatniku je med drugim gojil velikanske metulje jamamaje, ki še dandanes letajo naokrog po Sloveniji, vendar zaenkrat še globoko pod nadzvočno hitrostjo.

3 ROBIDOV ŠTUDENT SALCHER V TOVARNI TORPEDOV NA REKI

Peter Salcher se morda ni strinjal z vsemi Ernstovimi pozitivističnimi ali celo ateističnimi idejami, ki so vzdignile mnogo prahu onih dni in celo Lenina napeljale k pisanju knjige proti Machu in njegovim ruskim zagovornikom. Toliko bolj pa je Petru godil Ernstov sloves starejšega fizika, izkušnega v domiselnih poskusih. Zato si ni dal dvakrat reči. Povezal se je s starejšim sinom in solastnikom lastnika tovarne torpedov Johnom Whiteheadom (1854 Trst–1902 Reka), tako da sta skupaj z Ernstom objavljala izsledke fotografiranih nadzvočnih balističnih poskusov pri dunajski akademiji od 1887 do 1890. V zadnji razpravi sta posebej poudarila prednosti osvetljevanja fotografiranega valovnega čela z Geisslerjevo katodno elektronko, katere »svetloba je imela tudi zelo dober fotografski učinek«.³ Pomagali so jim reški fotografi in kemiki, ki prav tako niso bili od muh. Whiteheadi so bili zelo zainteresirani za rezultate, saj so termodinamični pojavi pri iztekanju zraka pod visokim tlakom reševali številne probleme poganjanja torpeda od zmrzovanja zaradi Joule-Thomsonovega širjenja do turbulenc.

Ernst je v Pragi uporabljal pištolo, katere izstrelki niso prebijali zvočnega zidu in zato pričakovane nadzvočne fotografije, seveda, niso bile uspešne. Salcher je raje uporabljal puške kalibrov od 8 mm do 11 mm, ki so izstreljevale nadzvočna zrna do 530 m/s.



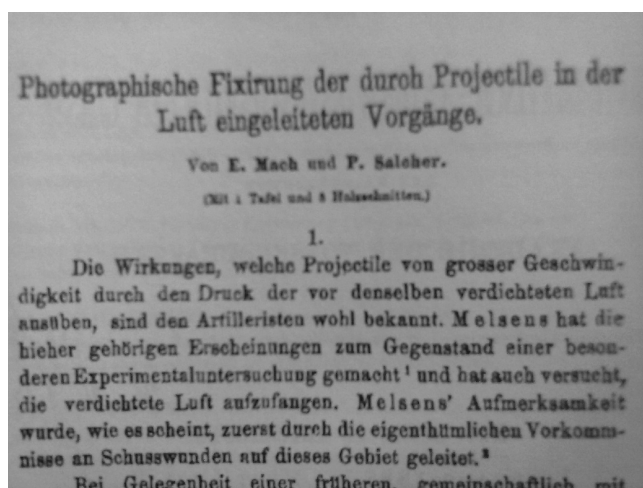
Slika 7: Toeplerjeva optična klop »Schieleren« iz leta 1864, ki je navdihnila uspehe njegovega učenca Salcherja in Macha.

³ Mach, Salcher, 1890, 1306

Izstrelke so osvetljevali z električno iskro leidenske steklenice, pri fotografiranju pa so pomagali še drugi reški strokovnjaki. Streljali so v prostorih vojno-pomorske akademije, vendar bržkone ne v glavni stavbi, kjer streljanje z bojno municijo gotovo ni bilo v navadi. Dne 24. 4. 1886 je Salcher že poslal Machu prvih šest uspešnih fotografij, komaj tri mesece po Machovem začetnem predlogu. Eno prvih timskih fizikalnih raziskovanj je urno steklo, tesno navezано na tedanje vojaške potrebe. Mach je obiskal Salcherja na Reki in prisostvoval poskusnemu lansiranju torpeda v času velikonočnih praznikov med 22. 3. in 18. 4. 1887.

Jeseni 1887 je Salcher poskuse nadaljeval v Pulju. V tamkajšnji vojaški bazi je deloval zdravnik, visok mornariški častnik, Jožef Potočnik (* 1841 Zgornji Razbor pri Slovenj Gradcu–1894 Pulj), ki se je vojskoval pri Visu pod Tegetthoffovim poveljstvom in postal general; bil je oče izumitelja geostacionarnega satelita, inženirskega stotnika Hermana Potočnika - Noordunga (1892 Pulj–1929). V Pulju je služboval mornariški častnik Karel Jožef baron Codelli (1846–1878 Pulj), po maturi leta 1894 pa je tam delal do leta 1897 tudi njegov sin, častnik vojne mornarice, izumitelj televizije Anton baron Codelli (1875–1954) s Kodeljevega.

Vsekakor si lahko mislimo, da je pri poveljstvu habsburške vojne mornarice v Pulju kar mrgolelo od novih tehniških idej, tudi slovenskih. Salcher je v Pulju streljal s topom kalibra 90 mm s hitrostjo 448 m/s, Ernst Mach in njegov starejši sin, študent medicine Ludwig, pa sta fotografirala v tovarni Krupp v Meppenu pri Hannoverju izstrelke 40 mm pri 670 m/s, ki so tako dosegali kar dva Macha – seveda se je enota



Slika 8: Naslovna stran Machovega in Salcherjevega pionirskega članka nadzvočnih fotografij, ki sta ga priobčila v glasilo dunajske akademije *Wien. Berichte* leta 1887 v zvezku 95/2 na strani 764.

⁴ Medica, 2011, 316–317

⁵ Carus, 1911, 31

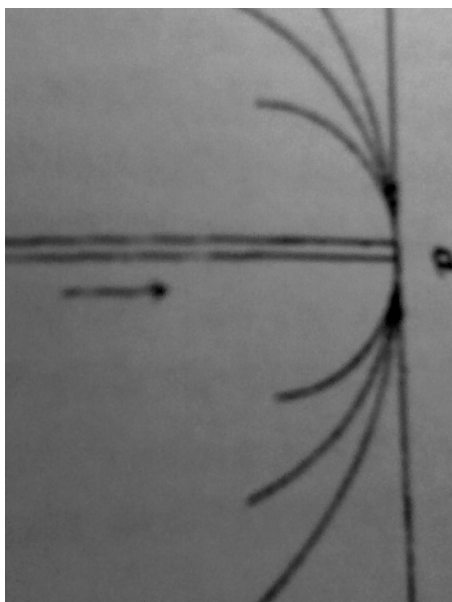
Mach uveljavila pozneje, prav nič pa ne bi škodilo, če bi jo imenovali po prav tako zaslužnem Salcherju.

Mach je ugotovil, da Melsens ni imel povsem prav, saj neznosnih ran ni povzročal stisnjeni zrak, porivan pred izstrelkom, in prav tako ne zrak za izstrelkom, ki si ga je svoj čas zamišljal Aristotel; poglobitni sta bili hitrost in oblika zrna. Prav tako je Mach sedaj lahko pojasnil, zakaj so na bojnem polju pok izstrelka slišali dvakrat; prvi od zvokov je namreč izviral iz preboja zvočnega zidu, ki je odtlej začel igrati važno vlogi v fiziki hitrih gibanj. Mach je postal znan, celo priljubljen; njegove in Salcherjeve fotografije nadzvočnih izstrelkov so objavljali tudi poljudni časopisi. Seveda pa je bil Machov stari nasprotnik Jožef Stefan še mnogo mogočnejši in je zlahka nastavljal Boltzmann in svoje druge somišljenike, podpornike kinetične teorije, na domala vse pomembne profesorske položaje v Habsburški monarhiji, podobno kot se je stoletje poprej posrečilo Boškovičevim zagovornikom točkastih središč sil kot svojevrstnim prednikom Stefanovih atomistov. Machovi dvomi v obstoj atomov so bili slej ko prej v prepričljivi manjšini, kar pa ni vplivalo na njegov uspešen eksperimentalni dvojec s Salcherjem.

Domiselni Salcher je zgodaj leta 1888 obrnil idejo poskusa in pustil izstrelak pri miru, nanj pa je usmeril curek stisnjene zraka pri 250 atmosferah v reški tovarni, kjer so izdelali prve torpede leta 1866 in jih dve leti pozneje 1868 prvi na svetu vgradili v lansirne cevi ladje z imenom Gemse. O uspešnih fotografijah obrnjenega Salcherjevega poskusa je poročal Mach 19. 4. 1888 pri dunajski akademiji.⁴ Poskusi in dopisovanje med Petrom in Ernstom so trajali do leta 1892, novo poglavje balistične vede pa je bilo napisano prav z njimi na relaciji med Prago, Velikim Slatnikom, Reko in Dunajem.

Pota obeh uspešnežev sta se nato ločila: Salcher je bil že leta 1902 mornariški uradnik VI. ranga, visoko čislan na dvoru. Machov mlajši sin si je takoj po izjemno uspešni promociji v Göttingenu leta 1894 privoščil enega tedaj zelo modernih samomorov,⁵ ki niso obšli niti samega presvetlega prestolonaslednika Rudolfa leta 1889. Štiri leta po sinovi tragediji je užaloščenega očeta Ernsta zadela kap, zaradi katere je ohromel po desni strani. Zato je moral opustiti dunajsko filozofsko naravnano katedro, ki se je je tako veselil in je šla tako v nos Leninu in Machovemu nasledniku Ludwigu Boltzmannu skupaj z njegovo na pol slovensko soprogo.

Do konca pa je Mach rad pomagal Slovencem, med drugim novomeškemu gimnazijskemu profesorju filozofije, matematike, klasičnih in živih jezikov med



Slika 9: Huygensovi dve stoletji starejši valovi iz Machovega in Salcherjevega pionirskega članka nadzvočnih fotografij, ki sta ga priobčila v glasilu dunajske akademije *Wien. Berichte* leta 1887 v zvezku 95/2 na strani 769.

letoma 1897–1921 Mihaelu Markiču (M. Posavski, 1864 Kranj–1839 Ljubljana). Mihaelovo priredbo Boolove algebre, objavljene leta 1899, 1900 in 1914 v nemških izvestjih novomeške gimnazije, je Ernstu priporočila sestra Marija (* 1844), sicer dokaj uspešna pisateljica novel o Velikem Slatniku in o svojem vzgojiteljskem delu pri črnogorski kraljevi družini. Leta 1912 in v popravljeni ter dopolnjeni izdaji naslednje leto je objavila spomine na mater z Ernstovim predgovorom.⁶ Kljub Machovi podpori je ljubljanski profesor France Veber (1890–1975) leta 1920 ostro kritiziral Markiča in matematično logiko nasploh.

Ernstove nadzvočne sanje spod Gorjancev so se uresničile. Zvočni zid je bil prvič namenoma prebit. Pol stoletja po njegovi smrti je prvo nadzvočno letalo Concorde poletelo s potniki dne 2. 3. 1969, vendar so po 26. 11. 2003 vseh 20 Concordovih letal »upokojili«. Podobno se je zgodilo s sovjetskim nadzvočnim letalom Tupoljev TU-1544, ki so letala še nekoliko hitreje, vse do 2,35 Macha, vendar zgolj od 1975 do 1978. Machu bi bilo gotovo žal.

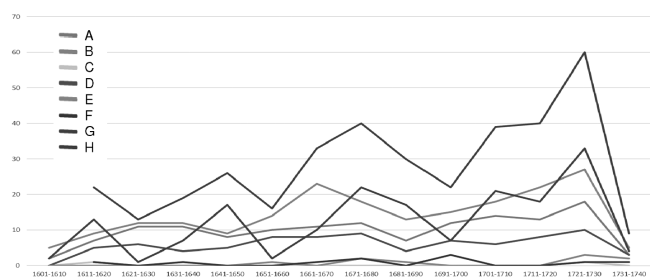
4 ULTRAHITRE FOTOGRAFIJE ZA IZBOLJŠANJE NAPRŠEVANJA TANKI PLASTI

Machove ultrahitne fotografije so kmalu zaživele svoje življenje zunaj stroge balistične uporabe. Danes so med drugim nadvse pomembne za preučevanje plazme in njenih turbulenc, ki pomembno vplivajo na

nanašanje nanometrskih napršenih tankih plasti. Po Grovejevem in Robidovem naprševanju kovin je Arthur Williams Wright leta 1877 v *American Journal of Science* objavil uspešno naprševanje številnih plasti platine, zlata, aluminija, cinka, železa in številnih drugih kovin; opisal je tudi njihovo stabilnost v atmosferi kot pogoj za uporabnost.

Robida je Grovejev poskus naprševanja ponovil zgolj pet let po Groveju leta 1857, desetletje preden je postal razrednik, profesor matematike in fizike Petra Salcherja. Robidov poglavitni sodelavec Simon Šubic je bil Salcherjev profesor celotne teorijske fizike v prvem letniku Salcherjevih graških študijev, potem ko je Šubic od 19. 4. 1866 do 11. 3. 1867 v Gradcu predaval fiziko družno z Ernstom Machom, ki je leta 1864 začel v Gradcu predavati matematiko.⁷ Šubic je veliko objavljajal o fotografiranju v znanstvene namene, tudi v slovenskem jeziku, Robida pa je Salcherju v Celovcu že kazal svoje desetletje stare mikroskopske fotografije, verjetno dobljene po Ettingshausenovi svoj čas leta 1840 na novo izumljeni metodi. Seveda je pri Robidi pridobljeno znanje Salcher vsestransko dopolnil med graškim študijem eksperimentalne fizike ob gradnji največjega fizikalnega inštituta v Habsburški monarhiji pri svojem graškem profesorju Augustu Toeplerju. Toeplerjeva tako-imenovana *schlieren* fotografska metoda, temelječa na razlikah v gostoti zraka, je postala osnova za Salcherjevo fotografiranje nadzvočnih izstrelkov na Reki po Machovih navodilih.

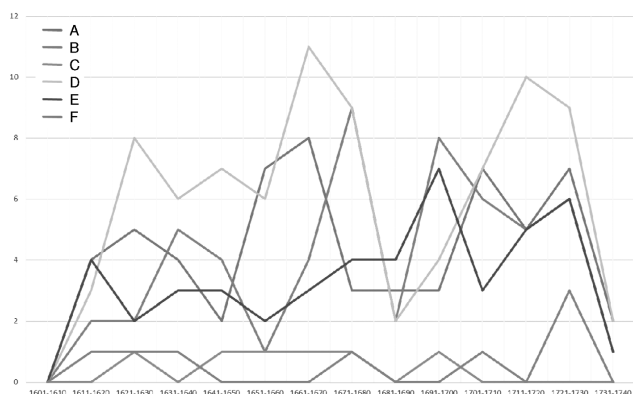
Žal Toeplerja pri reških poskusih ni bilo zraven. Čeprav je bil dobrovoljen mož in Boltzmannova graška poročna priča ob poroki z napol Slovenko Jeti,



Slika 10: Profesure tehniških ved in ohranjeni spisi 155 celovških profesorjev matematike in filozofije s fiziko glede na leto rojstva. A: prvih fizikalnih profesorjev celovških profesorjev matematike in filozofije v letih od skupno 140, B: vseh fizikalnih profesorjev v letih od skupno 204 pod taktirko 157 profesorjev filozofije s fiziko ali matematiko, C: astronomskih spisov od skupno 2, D: vseh spisov od skupno 84, E: matematičnih spisov od skupno 10, F: fizikalnih spisov od skupno 12, G: vseh matematičnih profesorjev in repetacij po letih rojstva nosilcev od skupno 174, H: fizikalnih in matematičnih profesorjev ter repetacij po letih rojstva nosilcev od skupno 378

⁶ Mach, 1912, 1913

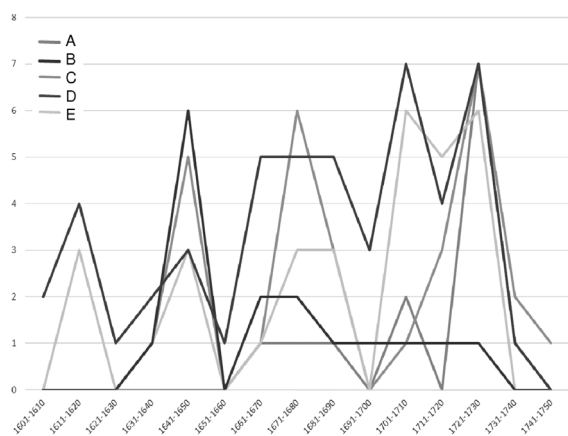
⁷ Carus, 1911, 28



Slika 11: 155 celovških profesorjev matematike in filozofije s fiziko kot študentov filozofije in teologije glede na leto rojstva. A: začetek študija filozofije v Gradcu od skupno 61 študentov med 157 profesorji, B: študij filozofije na Dunaju od skupno 56 bodočih celovških profesorjev matematike in filozofije s fiziko, C: študij filozofije v Trnavi od skupno 6 študentov med bodočimi celovškimi profesorji matematike in filozofije s fiziko, D: študij teologije v Gradcu od skupno 85 študentov med 157 poznejšimi profesorji matematike in filozofije v Celovcu, E: začetek študija teologije na Dunaju od skupno 49 bodočih celovških profesorjev matematike in filozofije s fiziko, F: študij teologije v Trnavi od skupno 8 bodočih celovških profesorjev matematike in filozofije s fiziko

ki se je najprej kot prva habsburška študentka fizike Boltzmannu domiselno pritoževala nad domnevno Toeplerjevo antipatijo, se mu je fizika morda nekoliko zamerila, potem ko je ravno ob dograditvi svojega fizikalnega inštituta leta 1874 v Gradcu padel z nadstropja v pritličje in se močno poškodoval ob božiču leta 1875.⁸

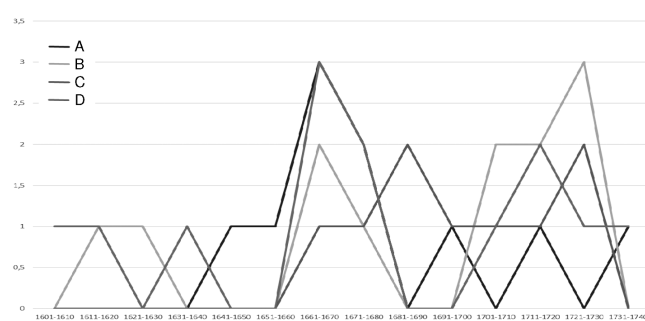
Einsteinov naslednik na položaju izrednega univerzitetnega profesorja züriške univerze, leto dni mlajši Heinrich Greinacher (31. 5. 1880–1974), je razvil



Slika 12: Celovški profesorji matematike in filozofije s fiziko na 5 najpogostejših matematičnih katedrah. A: ljubljanskih kateder matematike, B: linških kateder matematike, C: graških kateder matematike, D: celovških kateder matematike, E: dunajskih kateder matematike

⁸ Jungnickel & McCormach, 1986, 67; Stiller, 1989, 53

⁹ Adler, 45



Slika 13: Celovški profesorji matematike in filozofije s fiziko na štirih najpogostejših filozofskih katedrah drugod. A: graških kateder filozofije in fizike, B: goriških kateder filozofije in fizike, C: ljubljanskih kateder filozofije in fizike, D: passavskih kateder filozofije in fizike

votlinski magnetron kot novo priložnost za meritev oz. izračun mase elektrona leta 1912 v Zürichu, takoj po svojem prihodu na tamkajšnjo univerzo. Einstein je bil nato med letoma 1912–1914 njegov sosed kot profesor na züriški ETH. Ni pa hotel leta 1914 prevzeti dvojne profesure v Zürichu, na univerzi in ETH, kar bi ga naredilo za Greinacherjevega sodelavca, potem ko sta oba doktorirala oziroma se habilitirala na univerzi v Zürichu leta 1905 oziroma 1907.

Einsteinov sosed v Zürichu je bil tudi sošolec raziskovalec specifičnih toplot, Lenin pa je nedaleč stran v züriških knjižnicah sestavil uničujočo kritiko Macha in Adlerja.⁹ Žrtvi gotovo nista povsem natančno vedeli, v katerem grmu leži zajec, dokler ni čez dolgih sedem let siti Adler ustrelil lačnega habsburškega ministrskega predsednika v prestižni hotelski restavraciji popoldne 21. 10. 1916, ob letu obsorej pa se je Lenin usodno dokopal do oblasti.

Obetavne začetke magnetrona so nato prevzeli denarništvu bolj naklonjeni učenjaki onstran Atlantika. Američan Albert Hull (1880–1966) je magnetron dodelal v laboratorijih *General Electrica* (Schenectady, New York), da bi zaobšel patent triode konkurenčnega podjetja *Western Electrica* s kontroliranjem toka z magnetnim poljem namesto z mrežico. Hill se sprva ni nameraval spuščati v zelo visoke frekvence elektromagnetnih valov, tja pa sta magnetron vsak zase zapeljala Čeh s praške Karlove univerze Avgust Žáček (1886–1961) in jenski doktorski študent Nemeč Erich Habann (1892–1968) vse do gigahertzov leta 1924. Iznajdba je cvetela med razvojem radarja v drugi svetovni vojni, še posebej v vojni za Anglijo, kjer sta votlinski (cavity) magnetron leta 1940 razvijala John Randall (1905–1984) in Harry Boot (1917–1983) ob pomoči Irca Jamesa Sayersa (1912–1983) z univerze Birmingham.

Tajno pred Nemci skrito preučevanje je usmerjal potomec izumitelja parnih strojev Jamesa Watta,

Robert Alexander Watson - Watt (1892–1873). Bil je hudomušen vodja. Ko so ga pozneje že kot slavnega moža kanadski policisti ustavili zaradi prehitre vožnje, je zgrožen vzkliknil: »Če bi vedel, kaj boste počeli z mojim radarjem, ga nikdar ne bi izumil!« Pa ni pomagalo, nekaj cvenka je bilo treba vendarle izkašljati.

Industrijska uporaba milijonov magnetronov je nato šla dolga leta v prid mikrovalovnih pečic, dokler le-te niso spravile fast food gospodinj ob dober glas. Razvita obetavna tehnika pa je urno našla nova področja uporabe, ko so jo tekmeči izpodrinili tudi pri radarjih. Osnovna fizikalna značilnost votlinskega magnetrona je konfiguracija električnega in magnetnega polja, ki sta med sabo prekrížana. Ta omogoča, da se elektroni vrtijo okrog magnetnih silnic in se hkrati gibljejo v smeri, ki je pravokotna na obe polji. V doslej omenjenem votlinskem magnetronu je to namenjeno generiranju mikrovalov. Poznamo pa tudi naprševalni magnetron, kjer takšno gibanje elektronov izkoriščamo za zgoščevanje plazme ter s tem za učinkovito naprševanje tankih plasti. V praksi obema komponentama rečemo »magnetron«, čeprav se tehnično precej razlikujeta.

Obetavno nanašanje nanometrskih tankih plasti, napršenih z magnetronom, je bilo prvič uporabljeno v 1970. letih v sočasnih iznajdbah številnih raziskovalcev planarnega magnetrona, kjer sekundarni elektroni v procesu naprševanja in povečevanju energije elektronov na površini in ob njej priskrbijo energijo, potrebno za ohranjanje razelektivitve v magnetronu.

Neuravnoteženi magnetron kot prvi korak k uporabi plazme za rast tankih plasti z magnetronom sta prva uporabila B. Windows in N. Savvides leta 1986, samonaprševanje z ioni same tarče pa so prvič opazili leta 1977, lociranje ionizacije v conah in samoorganiziranje v turbulencah pa so Nemeč André Anders z Berkeleyja in drugi neodvisno opazili leta 2012. Ionizirani deli prispevajo k prenašanju naboja vzdolž silnic magnetnega polja s turbulentnim tokom.¹⁰ Golo oko vidi ionizacijski proces porazdeljen homogeno. S pomočjo Mach-Salcherjevih dedinj, hitrih kamer ICCD (*intensified CCD*), pa razločimo več svetlih območij, ki se gibljejo vzdolž vzorca. Takšna ionizacijska območja so krstili za napere (spokes) po analogiji s podobnimi pojavi v plazmi; vzdržujejo jih

elektroni v kompleksnih električnih in magnetnih poljih.

Hitra fotografija, seveda veliko hitrejša od Mach-Salcherjeve, je temeljno orodje za določanje narave teh turbulenc na podoben način, kot je veljal svoj čas pri Mach-Salcherjevih turbulencah udarni val izstrelka. Visokoenergijsko impulzno magnetronsko naprševanje (HiPIMS) kot visoko ionizirana tehnologija ima že dobre reference pri izdelovalcih tankih plasti, saj je kompatibilna z obstoječimi PVD-napravami in ponuja zelo trde prevleke in optične tanke plasti.¹¹

5 SKLEP

Fotografija ujame sedanjí trenutek za prihodnje rodove. Hitra fotografija ujame celo tisto, kar razmeroma okorno človeško oko sploh ne zmora zaznati. Tako naredi vidne očem povsem nevidne reči, podobno kot mikroskop ali teleskop. Svoj čas je bliskoviti posnetek razkril turbulence ob nadzvočno hitečih izstrelkih, o katerih sta se pričkala oba Macha pod Gorjanci. Jutri pa bo, kot pribito, razkril turbulentne tokove plazme za učinkovitejšo naprševanje z magnetroni.

6 LITERATURA

- Adler, Friedrich. 2001. Selected Mach-Adler Correspondence, *Ernst Mach's Vienna 1895–1930: Or Phenomenalism as Philosophy of Science* (Ed. J.T. Blackmore). Boston Studies in History and Philosophy of Science. 45–60
- Carus, Paul. 1911. Professor Mach and his work, *The Monitor*, 21/1: 21–31
- Jungnickel, Chreista; McCormmach, Russell. 1986. *The now Mighty Theoretical Physics 1870–1925*. The University of Chicago Press 2. del
- Mach, Maria (anonimno). 1912. *Erinnerungen einer Erzieherin. Nach Aufzeichnungen von (Marie Mach) mit einem Vorwort hrsg. von Ernst Mach*. Wien/Leipzig: Braumüller, VI+319 strani, 2. izboljšana izdaja 1913, VIII+333 strani v osmerki
- Mach, Ernst; Salcher, Peter. 1890. Optische Untersuchung der Luftstrahlen. *Wien.Ber.* 1308 (9 fotografij v prilogi)
- Medica, Vladimir. 2011. Peter Salcher and Optical Research Methods. *Peter Salcher & Ernst Mach* (ur. Franković, Bernard; Pohl, Gerhard), Zagreb: Hazu. 309–325
- Panjan, M.; Franz, R.; Anders, A. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 23 (2014)
- Panjan, P.; Čekada, M.; Panjan, M.; Paskvale, S.; Kek Merl. D. 2009. *Vakuunist*, 29 (2009) 1
- Stiller, Wolfgang. 1899. *Ludwig Boltzmann*. Frankfurt: Harri Deutsch

¹⁰ Panjan, 2014

¹¹ P. Panjan, Čekada, M. Panjan, Paskvale, Kek Merl, 2009, 31

DRUŠTVENE NOVICE

SPOROČILO ZA JAVNOST

Modularni detektor netesnosti ASI 35

- Največja učinkovitost s helijem in vodikom
- Zanesljiv, hiter in občutljiv
- Za industrijske sisteme detekcije netesnosti

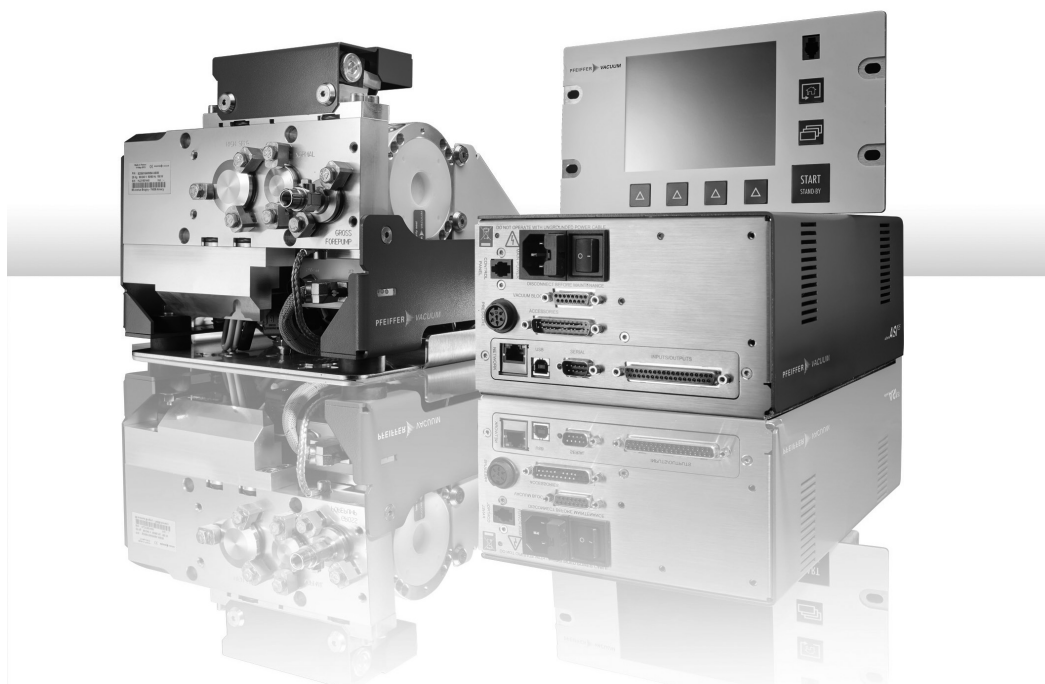
Aslar, Nemčija, 11. februar 2016. Detektor netesnosti Pfeiffer Vacuum ASI 35 je namenjen iskanju netesnosti v strojegradnji, velikih sistemih in pri končnih uporabnikih. Detektor se odlikuje po veliki zanesljivosti in ponovljivosti rezultatov meritev. Omogoča veliko učinkovitost z uporabo helija in vodika kot slednih plinov pri postopkih integralne in lokalizirane meritve netesnosti. Tako zagotavlja fleksibilnost pri zahtevnejših preizkusih z minimalnim signalom ozadja ter hitre odzive.

Zaradi modularne zasnove je ASI 35 optimiziran za minimalni prostor in maksimalno mogočo integracijo. Opcijski uporabniški vmesnik je lahko povezan s PC ali PLC. Le dva kabla potrebujemo za povezavo vakuumskega in elektronskega modula, tako da je ASI 35 mogoče preprosto sestaviti.

Druge prednosti sistema ASI 35 so: Turbomolekularna črpalka ima veliko črpalno hitrost in mini-

malne potrebe po vzdrževanju, detektor ima dve neodvisni žarilni nitki ter napredno elektroniko. Te značilnosti zagotavljajo dolgotrajno delovanje brez okvar. Sistem za detekcijo netesnosti lahko prilagodimo za preizkuse pri različnih načinih uporabe, tako za vakuumске (opihovalna metoda) kot za vohalne preizkuse, in to pri največji občutljivosti. Produktivnost sistema je zelo visoka, kakor tudi natančnost in ponovljivost merilnih rezultatov; en merilni cikel pa lahko traja vsega eno sekundo. Velika učinkovitost vohanja je prednost sistema ASI 35, ki je odličen detektor netesnosti, kadar potrebujemo vohanje na več mestih.

Modul z elektroniko je prilagojen za vse vrste omrežne napetosti, tako da lahko ASI 35 integriramo v sisteme po vsem svetu. Detektor netesnosti lahko deluje pri delovnih temperaturah do 45 °C. Poleg enostavne mehanske integracije je na voljo še vrsta priključkov za zajem podatkov in zunanji nadzor sistema. Osnovna verzija tega detektorja netesnosti pa lahko s prilagojeno I/O-konfiguracijo deluje tudi brez PC ali PLC.



Modularni detektor netesnosti ASI 35 podjetja Pfeiffer Vacuum

SPOROČILO ZA JAVNOST

Pfeiffer Vacuum že 50 let postavlja standarde v detekciji netesnosti

- Širok razpon detektorjev netesnosti že od leta 1966
- Detektorji netesnosti z uporabo helija ali vodika kot slednih plinov
- Novi detektorji netesnosti na trgu

Asslar, Nemčija, 29. februar 2016. Od miniaturnih enot elektronike do velikih rezervoarjev, od uhajanja tekočin in plinov do vdiranja plina v vakuumске sisteme – zahteve za detektorje netesnosti so tako raznolike, kot so različni industrijski izdelki. Širok nabor detektorjev netesnosti podjetja Pfeiffer Vacuum omogoča rešitve za vse te zahteve.

Izkušnje štejejo!

Leta 2016 je Pfeiffer Vacuum praznoval 50-letnico svojega prvega detektorja netesnosti. Podjetje je bilo ustanovljeno leta 1890 in je vodilni proizvajalec komponent in sistemov za ustvarjanje, merjenje in analizo vakuuma ter za detekcijo netesnosti. Leta 1966 so doma razvili prvi helijev detektor netesnosti ASM 4, ga patentirali in dali na trg. Začetek prodaje tega izdelka je bil pomemben mejnik v industriji. Leta 1985 je sledil prvi detektor netesnosti z integrirano turbomolekularno črpalko – ASM 110. Ta tehnologija je bila pomemben korak naprej v primerjavi s takrat dostopnimi sistemi. Prvi prenosni detektor netesnosti, imenovan ASM 310, je na voljo od leta 2009.

Široka izbira detektorjev netesnosti s helijem ali vodikom kot slednim plinom

Danes lahko Pfeiffer Vacuum upravičeno zagotavlja, da njegovi detektorji netesnosti najdejo vsako

netesnost. Nobena netesnost ni tako majhna ali tako velika, da je ne bi uspeli zaznati. Dr. Matthias Wiemer, član uprave podjetja Pfeiffer Vacuum Technology AG, pravi: »Pfeiffer Vacuum je edino podjetje, ki ponuja tako široko paleto detektorjev netesnosti z uporabo helija ali vodika kot slednega plina ter tako širokim spektrom uporabe. Pfeiffer Vacuum razvija in uporablja detektorje netesnosti in povratne sisteme za helij pri aplikacijah, ki zahtevajo visoko produktivnost in vakuumsko tesne spoje. Naše strokovno osebje zagotavlja podporo kupcem in izbiri najboljših rešitev za njihove zahteve.«

Pfeiffer Vacuum vpelje priročnik za detekcijo netesnosti

»*Leak Detection Compendium*« (priročnik za detekcijo netesnosti) podjetja Pfeiffer Vacuum ponuja široko znanje o detekciji netesnosti in o samih preizkusih. V pregledni obliki so opisani detektorji netesnosti in sistemi ter različne metode merjenja. Vsebino priročnika lahko enostavno razumemo, saj je napisana s poudarkom na uporabniku. Diagrami in fotografije dopolnjujejo pisno gradivo. Številni namigi vrhunskih uporabnikov s področja detekcije netesnosti ponujajo uporabniku dodatno pomoč pri posameznih aplikacijah. Tabele so jasno predstavljene in omogočajo preprosto pretvorbo enot in drugih vsakodnevnih postopkov pri detekciji netesnosti. Priročnik se odlikuje tudi po jasni strukturi in preglednosti. Dr. Matthias Wiemer pojasnjuje: »Ponosni smo na priročnik za detekcijo netesnosti, ki je enkratni praktični pripomoček za naše kupce pri njihovem delu. V priročni knjižici je zgoščeno vse relevantno znanje – od opisa posameznih slednih plinov preko razlag različnih metod merjenja netesnosti do prikaza koristnih primerov iz praktične rabe.«



Slika 1: Pfeiffer Vacuum ponuja širok razpon detektorjev za različne namene uporabe; kot sledni plin se uporablja helij ali vodik.



Slika 2: Manfred Bender (član uprave), Eric Taberlet (predsednik poslovne enote Semiconductor & Coating) in dr. Matthias Wiemer (član uprave) z detektorjem netesnosti ASM 340

Zaradi tesnega sodelovanja z našimi kupci in osredinjenja na njihove probleme Pfeiffer Vacuum stalno izpopolnjuje in razširja svoj asortiment. V preteklih mesecih so bile na trgu predstavljene naslednje inovacije:

ASM 340 – Detekcija netesnosti tudi pri 100 hPa

ASM 340 je zmogljiv in robusten detektor netesnosti, namenjen zanesljivi kontroli kakovosti. Pokriva širok spekter uporabe od industrijskih in analitičnih aplikacij do raziskav in razvoja, kakor tudi področje prevlek. Je kompakten detektor netesnosti in je namenjen tako serijski proizvodnji kot tudi za vzdrževalna dela. Na voljo je s konvencionalno ali suho črpalko, obstaja pa tudi verzija brez predčrpalke.

ASM 340 lahko uporabljamo za kvalitativno lociranje netesnosti ali pa za kvantitativno preizkušanje, bodisi integralno ali lokalno. Odlikuje se po zmogljivem vakuumskem sistemu, ki zagotavlja izjemno kratek čas do operativne pripravljenosti. Njegova odlika je tudi v hitrem odzivnem času zaradi velike črpalne hitrosti za helij. Vse te značilnosti pripomorejo h kratkim ciklom in veliki produktivnosti. ASM 340 je edini detektor netesnosti na trgu takšnega razreda, ki lahko locira netesnosti tudi pri 100 hPa.

Modularni detektor netesnosti ASI 35

ASI 35 je idealna rešitev za integracijo v industrijske sisteme za detekcijo netesnosti. Ta detektor ima dobro kombinacijo zmogljivosti, zanesljivosti in ponovljivosti pri zelo dolgih časih uporabe. Z uporabo helija ali vodika kot slednega plina omogoča odlično vedenje pri metodah integralnega ali lokalnega preizkušanja ter pri kombinaciji obeh. Ker je zelo fleksibilen, je ta detektor idealen za zahtevne razmere preizkušanja, saj ima zelo nizek signal ozadja, omogoča pa kratke cikle.

Napravo lahko uporabljamo za merjenje netesnosti v različnih načinih uporabe vakuumskega preizkušanja ali preizkusov vohanja pri največji občutljivosti. ASI 35 je zelo zmogljiv inštrument, ki zagotavlja precizne in ponovljive rezultate pri izjemno kratkih ciklih, dolžine le ene sekunde pri detekciji netesnosti. Zaradi velike zmogljivosti pri procesih vohanja je ASI 35 še posebej primeren za vohanje na več točkah.

Elektronika deluje pri različnih napetostih omrežja, zato lahko ASI 35 preprosto integriramo v sisteme, ki so namenjeni uporabi po celem svetu. Detektor netesnosti lahko deluje pri zunanji temperaturi do 45 °C. Mehansko povezovanje je preprosto, na voljo pa je tudi vrsta priključkov za enostavni priklop na zunanje sisteme.

Sistem AMI 120 za preizkušanje farmacevtske embalaže

AMI 120 je poseben sistem za nedestruktivno preizkušanje netesnosti farmacevtske embalaže. Ta inovativni sistem omogoča zelo občutljivo kvantitativno preizkušanje netesnosti, ki se izvaja v realnem času brez uporabe posebnih slednih plinov.

Penetracija vlage, kisika ali mikrobioloških materialov lahko znatno poslabša kakovost zdravil. Celo minimalne netesnosti v embalaži z luknjami pod 1 µm v premeru lahko pokvarijo stabilnost zdravila. Z uporabo AMI 120, ki je potrjen od farmacevtskih podjetij, lahko stopnjo netesnosti izmerimo v ciklu manj kot 45 s za velikost luknje od 0,1 µm dalje.

Preizkusni sistem ima svojo kalibracijsko linijo z uporabo definiranih netesnosti. To zagotavlja, da AMI 120 vedno deluje zanesljivo. Uporablja patentiran proces za notranjo procesno kontrolo med preizkušanjem netesnosti farmacevtske embalaže.

AMI 120 je enostavno postaviti in je občutljivejši in hitrejši od konvencionalnih preizkusnih metod. Sistem ustreza standardu CFR21, 11. del, in je dobro uporaben, saj ne potrebuje specialnih slednih plinov. Preizkus tesnosti je s tem instrumentom primeren za vse tipe farmacevtske embalaže.

JVC16 - 16th Joint Vacuum Conference EVC14 - 14th European Vacuum Conference SloCroVM-23

Portorož, Slovenia, June 6-10, 2016



CONFERENCE VENUE

Conference will take place at the Bernardin Congress Centre which is located at a tourist resort on the Adriatic coast walking distance from the medieval towns of Piran and the modern seaside resort of Portorož in Slovenia.

CONFERENCE TOPICS

- Applied surface science
- Surface science
- Vacuum science and technology
- Thin films and coatings
- Nanotechnology
- Plasma science and technology
- Electronic materials
- Surface engineering
- Biointerfaces

Selected papers will be published as a special issue of the **Vacuum** journal.

IMPORTANT DATES

- Registration: 1st January 2016
- Abstract deadline: 29th February 2016
- Early registration: 30th April 2016
- Preliminary program: 1st May 2016



ORGANIZER

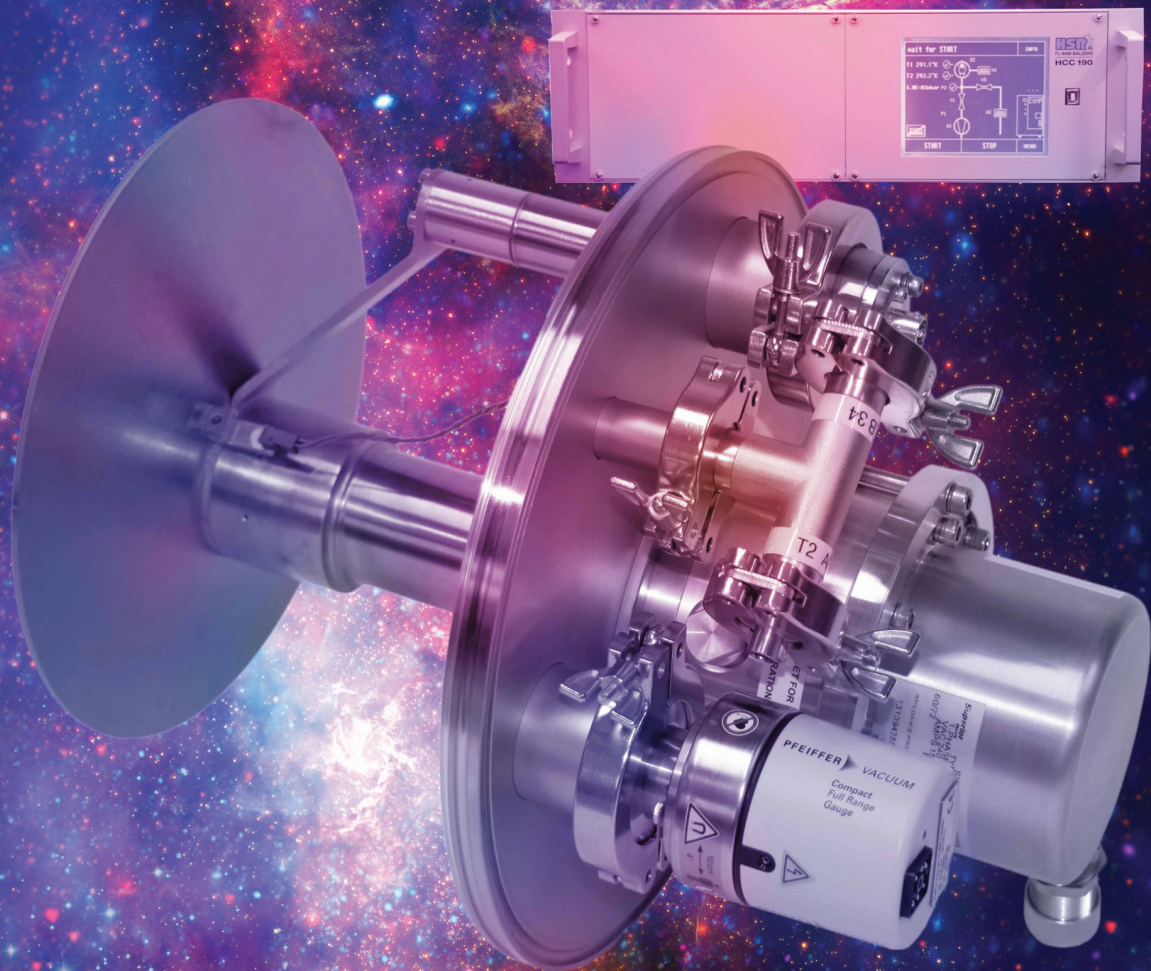
Slovenian Society for Vacuum Technique

Contact person

Janez Kovač, Chair of JVC-16/EVC-14
Jozef Stefan Institute, Jamova 39,
SI-1000 Ljubljana, Slovenia
janez.kovac@ijs.si

www.jvc-evc-2016.org

Leading vacuum technology for spaceprograms



SCAN d.o.o., Preddvor
Nazorjeva 3 · SI-4000 Kranj · Phone +386-4-2750200
www.scan.si · info@scan.si

HSR Temperature Controller HCC 190 for Cryostats and Cryo Pumps

HSR cryo controller HCC190 allows an operation of either cryo pumps or cryostats which are equipped with a maximum of 3 cold heads within the same system. It includes an additional, special feature which provides a fully automatic control of temperatures for a particular stage of the cooling system (T1 and/or T2). The control accuracy of the system is +/- 1K.



50 YEARS OF LEAK DETECTION

Experience makes sense!

Pfeiffer Vacuum is the supplier with the widest range of leak detectors on the market. We provide solutions for applications using helium and hydrogen as tracer gas.

From portable devices to complex leak detection systems – we always offer the optimum solution to detect leakages in many different industrial sectors.

Competence, quality and service from a single source.



Learn everything
about leak detection here:

leak-detection.pfeiffer-vacuum.com

Are you looking for a perfect vacuum solution? Please contact us:

SCAN d.o.o. Preddvor · T +386 4 2750200 · F +386 4 2750240 · info@scan.si

Pfeiffer Vacuum Austria GmbH · T +43 1 8941704 · F +43 1 8941707 · office@pfeiffer-vacuum.at

www.pfeiffer-vacuum.com

