

# Določevanje velikosti stične ploskve med kroglo in kovinsko folijo pri obremenitvi z atmosferskim tlakom

## Determination of Real and Apparent Contact Area between a Sphere and Thin Metal Foil Loaded by External Pressure

V. Nemanič<sup>1</sup>, ITPO, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-01-22

*Bistven prispevek k termični izolativnosti diskretno podprte evakuirane strukture, uporabne kot izolacijski panel, predstavljata kontaktni upornosti med krogli, ki tvorijo podporo in med kroglo in kovinsko folijo. Za zadnji kontakt je dokaj težko izmeriti navidezno kontaktno površino ali napovedati dejansko velikost oz. efektivno toplotno prevodnost. Večina poznanih metod karakterizacije površine je namreč prilagojena za merjenje ravnih ploskev. S podatki o hrapavosti površine lahko uporabimo primeren teoretični model, ki da zvezo med silo in kontaktno upornostjo. V delu predstavljamo kombinirano testno metodo, ki daje posredno vpogled na dogajanje na meji med podporo in folijo, ko je ta obremenjena z atmosferskim tlakom. Iz dobljenih podatkov je moč napovedati optimalno razmerje med gostoto podpor in njihovo velikostjo v režimu, ko je kroglica deformirana elastično, folija pa tudi plastično.*

*Ključne besede: kontaktna termična upornost, krogla, tanka kovinska folija*

*In a thin-wall flat all metal panel with an array of supporting beads, solid state conduction is determined by internal, nearly "point" contacts between balls forming beads and between balls and the foil. For the last contact, it is difficult to measure apparent contact area and predict real contact area which determines contact conductance. Most of the standard methods of characterizing the surface require flat surface in order to predict contact resistance by appropriate theoretical model. Indirect method, based on analogy between electrical and heat current was applied in order to determine actual contact area between the ball and the foil when atmospheric pressure is applied to the foil. From the results, optimum between supporting ball dimension and separation between them can be found. The ball is deformed elastically, while the foil can be locally deformed plastically, too.*

*Key words: thermal contact conductance, spherical indenter, thin metal foil*

### 1 Uvod

Ideja ultra tankega termično izolativnega panela (VPI), **slika 1**, temelji na zmanjšanju vseh treh mehanizmov prenosa toplote: prevajanja po trdni snovi, prenosa v plinu in sevanju. Metode zmanjševanja slednjih dveh so poznane, saj jih izkoriščamo v dewarjevih in superizoliranih posodah. Prevajanje po trdni snovi je v opisanih primerih zmanjšano tako, da razmeroma debeli steni posod, valjaste ali okrogle oblike povezuje tanek vrat. Za vakuumski izolativni panel pa želimo uporabiti tanke stene, mestoma podprte s podporami s čim manjšo termično prevodnostjo<sup>1</sup>. Dodatne zahteve za podpore so vakuumске narave. Da bi lahko VPI, ki ima že sicer neugodno razmerje med geometrijsko površino in volumnom, v sprejemljivo kratkem času izčrpali do stabilnega vakuuma, morajo imeti stene in podpore majhno fizično površino. S to zahtevo se odpovemo podporam iz mikroporoznih snovi.

Nadaljnji izbor med primernimi materiali zajema snovi s čim manjšo toplotno prevodnostjo in čim večjim elastičnim modulom oz. točko porušitve. Takšne snovi so steklo in nekatere vrste keramike. Od možnih oblik podpor sem se omejil na kroglo oz. podpore, sestavljene iz večih krogel, ki tvorijo stabilno enoto.

Razmere pri dotiku dveh elastičnih krogel z različnima moduloma ( $E_1, \mu_1, E_2, \mu_2$ ), s polmeroma ( $r_1,$

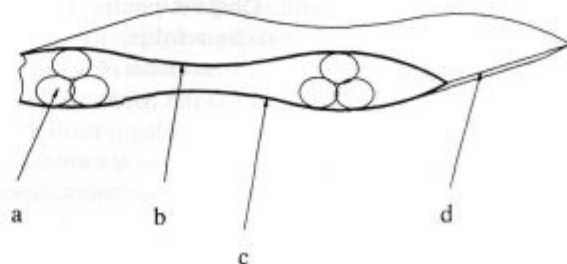
$r_2$ ), na kateri deluje sila  $F$ , z mehanskega vidika dobro opiše Hertzova formula, s pomočjo katere dobimo kot rezultat polmer stične ploskve<sup>2</sup>:

$$r_c = \sqrt[3]{\frac{3F}{4} \left\{ \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right\}^{-1} \cdot \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} \quad (1)$$

Z vidika transportnih pojavov, bodisi da gre za električni ali toplotni tok, predstavlja močno zožena povezava med vodnikoma z radijem stičnega kroga  $r_c$ , tokovno omejitev, katere električno upornost  $R$  (ali toplotno prevodnost  $k_c$  izrazimo z:

$$R = \frac{\rho}{2r_c} \quad \text{oz.} \quad k_c = 2r_c \cdot \lambda_{\text{solid}} \quad (2)$$

$\rho$  - specifična električna upornost,  $\lambda_{\text{solid}}$  - specifična toplotna prevodnost



**Slika 1:** Shematski prikaz VPI a) podpora, b) tanka IR odbojna plast, c) folija, d) zvar

**Figure 1:** Schematic view of VPI: a) support - four ball bead, b) thin IR mirror, c) foil, d) weld

<sup>1</sup> Mag. Vincenc NEMANIČ, dipl.inž.fiz.  
Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko  
1111 Ljubljana, Teskova 30

V izpeljavi izrazov (2) je predpostavljeno, da sega vpliv zožitve daleč (v primerjavi z  $r_c$ ) v globino obeh vodnikov, (konstrikcija je dolga). Z minimalno numerično korekcijo veljata izraza tudi za prevodnost posamezne krogle. Preostali, večji del krogle prispeva k celotni upornosti skoraj zanemarljiv del.

Zgled za uporabnost obeh navedenih zvez je prevodnost (ali upornost) nasutja enakih elastičnih krogel, obremenjenih z zunanjim tlakom. Zaradi lažjega računa in predstave naj bodo zložene v kubičnem zlogu. Rezultat je zanimiv: prevodnost nasutja ni odvisna od velikosti kroglic. Ideja, da se celoten razpoložljivi prostor evakuirane reže napolni z nasutimi steklenimi kroglicami, je bila teoretično obdelana in realizirana. Težave pri evakuiranju dokaj zapolnjene reže do stabilnega visokega vakuumu pa so omejile njeno uporabnost na območje krioteperatur<sup>3</sup>.

Vsaka plast kontaktov krogla - krogla (debelina plasti  $2r_0$ , specifična prevodnost krogle  $\lambda_{solid}$ ) iz izraza (2) pomeni za prehod toplote omejen koeficient prehoda toplote  $h_c$ :

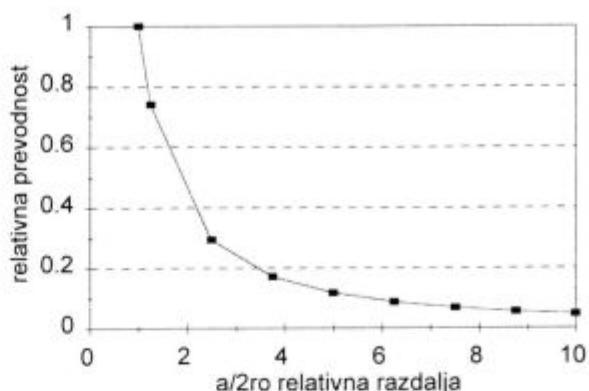
$$h_c = r_c \cdot \lambda_{solid} / 2r_0^2 \quad (3)$$

Izraz razumemo kot povprečno toplotno prehodnost skozi presek kvadratne ploskve debeline  $2r_0$ , oz. kocke, ki jo zaseda kroglica, ki tvori kontakt. Iz blagega naraščanja tlaka na mestu kontakta v odvisnosti od sile, izraz (1), je privlačna ideja, da od kroglic v nasutju ohranimo le tiste, ki so potrebne, da vzdržijo zunanji tlak. Nazorno si zamislimo, da se kocka spremeni v kvadratno prizmo s stranico  $a$ , s skoraj nespremenjeno višino ( $2r_0 - r_c^2/r_0 \approx 2r_0$ ), in nekoliko povečanim stičnim radijem, enačba (1). Korist spremembe je trojna:

- 1) zmanjšanje toplotne prehodnosti v razmerju, določenim z izrazom (1) in (3),
- 2) zmanjšanje mase,
- 3) povečanje prepustnosti reže za pretok molekul, kar bi omogočalo pripravo stabilnega izolativnega vakuumu v VPI tudi pri sobni temperaturi.

Oglejmo si na diagramu s **sluke 2** relativne prevodnosti krogel z večanjem medsebojne razdalje (nestabilna konfiguracija). Dokaj nizke vrednosti toplotne prehodnosti kontakta iz tabele nakazujejo, da ima lahko maksimalno obremenjena podpora, sestavljena iz para kroglic, nekajkrat nižjo prehodnost kot pa jih ima večje število manj obremenjenih v nasutju. Obakrat predpostavimo isto silo oz. enako veliko površino folije, na katero deluje zunanji tlak.

Nedvomno postanejo dejanski tlaki in napetosti v neposredni okolici kontakta omejitev pri večanju medsebojne razdalje. Analiza napetosti okoli Hertzovega kontakta pokaže, da je razlog za njegovo porušitev radialna napetost na robu (v praksi leži cona začetka razpoke nekoliko izven kontaktnega radija<sup>4</sup>). Če privzamemo za zgornjo mejo obremenitve za steklo Auerbachov kriterij, potem je dopustno obremeniti krogli s silo, ko je Hertzov radij (1) v mejah od  $0,025-0,03 r_0$ . V diagramu s **sluke 2** je varna meja, sicer nekoliko odvisna od velikosti krogel,



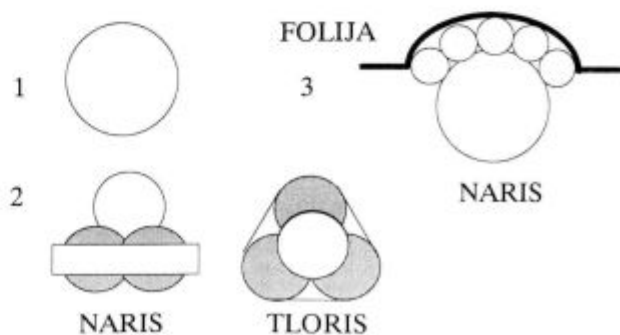
**Slika 2:** Zmanjševanje relativne prevodnosti ene plasti kontaktov, (dve kroglici) v odvisnosti od medsebojne razdalje  $a$ , (za nasutje steklenih krogel,  $a/2r_0=1$ , je prevodnost  $\lambda=13\text{mW/m.K}$ )  
**Figure 2:** Decreasing of relative conductance of single layer of contacts (ball-ball) by an increasing of their relative distance

pri tlaku 1 bar enaka 6 do 7 premerov krogle<sup>4</sup>, po podatkih iz<sup>5</sup> za hrapavo površino pa celo 8 premerov. Pri prevodnosti nasutja  $18-20 \text{ mW/m.K}$ , (za kubični zlog celo le  $13 \text{ mW/m.K}$ ), je zmanjšanje za razred velikosti nedvomno zanimiva možnost.

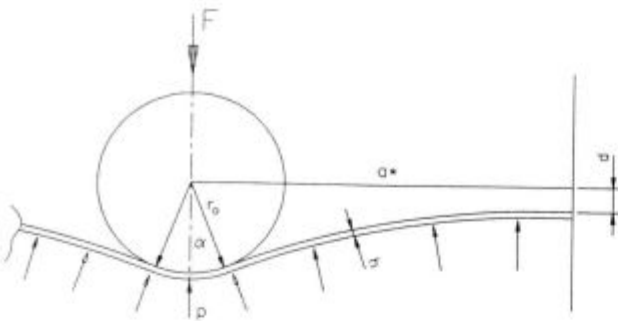
Doslej se še ni pojavilo vprašanje stabilnosti oz. tehnične izvedljivosti podpor. Nedvomno je nadgradnja velikega števila plasti možna pri nasutju krogel, v primeru diskretnih podpor pa ne, zaradi česar je uresničljiv le VPI iz enostavnih elementov, **slika 3**. Zanimajo nas torej izolativne lastnosti podpore, ki jo predstavlja:

1. ena sama krogla
2. izsek gosto zloženega zloga štirih krogel, shematsko predstavljenih na **sliki 1**
3. kombinacija krogel dveh različnih velikosti.

Omejitev prevodnosti predstavljajo v prvem primeru le zožitve na meji krogla - folija, v primeru 2 pa je tok omejen na plasti krogla-krogla (velja diagram na **sliki 2**) in s kontaktoma s folijo na vsaki strani podpore. Za oceno izolativnih lastnosti pa izrazi, ki smo jih smeli uporabiti v primeru Hertzovih kontaktov med krogla, ne veljajo. Velikosti stičnega radija ne moremo izračunati



**Slika 3:** Možne enostavne oblike podpor, ki imajo za osnovo kroglo  
**Figure 3:** Some simple support design based on the spherical shape



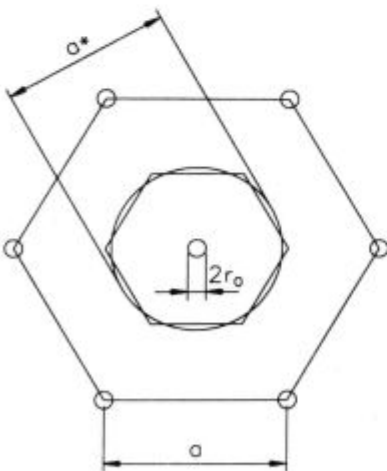
**Slika 4:** Razmere pri obremenitvi folije z zunanjim tlakom. Sila  $F$ , ki jo podpira krogla, je odvisna od efektivnega premera celice  $a^*$  na katero pritiska zunanji tlak

**Figure 4:** Contacting of the sphere and the foil Force  $F$  is determined by the cell area and external pressure

z enačbo (1), četudi ta velja za dotik krogle z ravnino ( $r_2 = \infty$ ) ali z vboklino, ki jo izrazimo z negativnim radijem.

Pri kontaktiranju (=evakuiranju) folije s kroglo se folija vede dokaj drugače kot elastični polprostor ali elastično telo. Prečna napetost v okolici kontakta lahko preseže elastične meje in tvori delno konformni kontakt, katerega prevodnost pa je dokaj težko napovedati. Upamo pa, da je velikost dejanske stične ploskve zaradi hrapavosti bistveno manjša od velikosti navidezne stične ploskve, ki jo na **sliki 4** vidimo označeno s kotom  $\alpha$ .

Če gledamo na kontakt kot pojav na meji ravnih ploskev, je navidezna stična ploskev definirana kot presek, kjer pride vodnik v stik z drugim vodnikom in se med kontaktiranjem z delovanjem sile ne spreminja. Podobno je definiran navidezni tlak, kot kvocient sile in navidezne ploskve. Zaradi neravnosti, bodisi hrapavosti ali valovitosti, je dejanska stična ploskev vedno manjša od navidezne. V primeru kontaktiranja folije, je navidezna stična ploskev določena z debelino in elastičnim modulom folije, velikostjo krogle in veli-



**Slika 5:** Tloris merilne ploskve za določitev kontaktne upornosti. Osnovno celico predstavlja 6 steklenih in merilna jeklena kroglica v sredini

**Figure 5:** Top view of the cell for contact resistance measurements. Measuring steel ball in the center is surrounded by 6 glass balls

kostjo celice, na katero pritiska zunanji tlak. Dejanska stična ploskev je zaradi hrapavosti obeh površin še vedno bistveno manjša od navidezne. Obe pa se z večanjem sile večata. Določitev obeh je možna le posredno:

- navidezne - z meritvijo odtisa na ukrivljenih kontaktnih ploskvah, ali določitvi sprememb na mestu kontakta po razklenitvi
- dejanske - preko električne ali toplotne prevodnosti, včasih tudi iz velikosti količnika trenja.

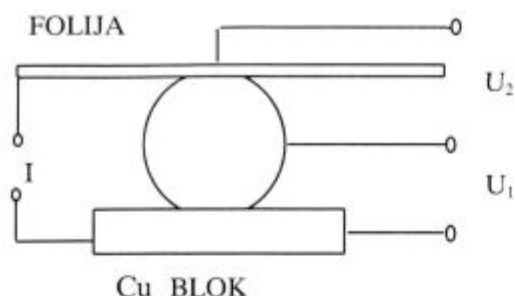
Metoda z meritvijo električne kontaktne upornosti je za izvedbo najlažja in daje za čiste površine natančne rezultate. Omejena je seveda na električne prevodnike. Meritev termične prevodnosti je za izvedbo bistveno težja, saj poteka v neizotermni okolici. Absolutne vrednosti toka pa so pri dielektrikih tudi zelo majhne. Za specifične potrebe je treba uporabiti več analitičnih metod, ki dajo vpogled in razumevanje kontaktiranja.

## 2 Eksperimentalni del

Namen eksperimentov je bil določitev navidezne in dejanske velikosti stične ploskve med kroglo in folijo, iz katere bi se dalo določiti velikost termične kontaktne upornosti, ko je krogla narejena iz neprevodnega materiala s podobnimi elastičnimi lastnostmi.

Za ustvarjanje razmer, podobnih tistim pri evakuiranju, sem izdelal stiskalnico, s katero sem na folijo izvajal enakomeren tlak. Od sedmih kroglic enakega premera, postavljenih na fiksna mesta šesterokotnika, sem za električne meritve izbral srednjo. Na njej so razmere glede prečne napetosti folije najbližje tistim, ki jih v VPI zunanji tlak izvaja na vsako od njih. Jeklena kroglica je bila kontaktirana na mestih, nakazanih na **sliki 5**, druge kroglice so bile steklene. Obtežbo na stiskalnici sem po stopnjah spreminjal v korakih, ki so pomenile povečanje tlaka za 0,1, in sicer od 0 do 1 bar. Zasnova meritev s spremenljivim tlakom omogoča določitev največje razdalje med podporami enostavneje kot v evakuiranem VPI, kjer lahko silo na kroglico spreminjamo le z medsebojno razdaljo med njimi.

Za določitev kontaktne upornosti med kovinsko folijo in kroglo, ki nastopa v vseh tipih podpor v VPI, sem uporabil električno analogno metodo, ko pri konstantnem toku merimo padec napetosti na samem kontaktu, **slika 6**. Izmerjene vrednosti med poznanima kovinama lahko z Wiederman-Franzovim zakonom uporabimo za dokaj točno napoved termične prevodnosti. Zaradi razmeroma majhnega navideznega tlaka, določenega predvsem z lastnostjo folije, lahko sklepamo, da se velikost dejanske stične ploskve ohrani tudi v primeru steklene ali keramične krogle s podobnim elastičnim modulom. Iz zveze (5) pa je razvidno, da je termična prevodnost odvisna predvsem od materiala z manjšo prevodnostjo, kar nakazuje, da je prispevek kontaktne upornosti med folijo in kroglo določljiv in primerljiv z velikostjo upornosti med kroglama.



Slika 5: Napetosti, ki jih merimo pri konstantnem toku I  
Figure 5: Contact voltages, measured at constant current I

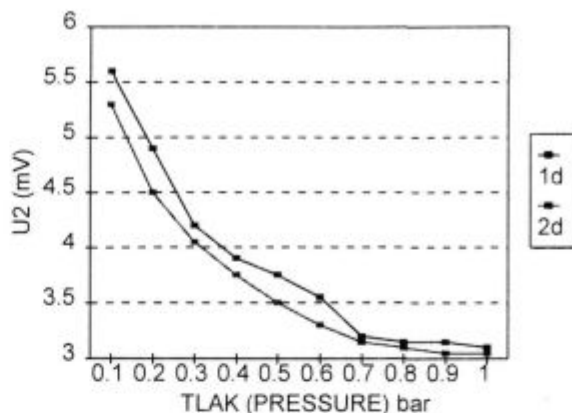
Za določitev navidezne stične ploskve sem na isti stiskalnici kroglo premazal s tanko plastjo metalografske diamantne paste (Metadi II, Buehler-Met, 1  $\mu\text{m}$ ) in jo med obremenitvijo zarotiral z ročico za kot cca. 20 stopinj. Nastale sledi sem na krogli in foliji opazoval s SEM in določil polmer največjega kroga, iz katerega sem določil velikost navidezne stične ploskve. Rezultat je bil enak kot v primeru, ko sem izmeril prečni profil kontaktnega mesta preko glavne smeri z mehničnim tipalom.

Konstantni tok skozi celo vezje je zagotavljal generator konstantnega toka (HP 6267B). Večino meritev sem opravil s tokom  $1,00 \pm 0,005$  A, ki sem ga spremljal z merjenjem padca napetosti (Keithley 173) na uporovni normalni. Izbrani tok je omogočal zanesljivo merjenje kontaktnih napetosti. Povečanje temperature na mestu kontakta, po izračuni preko električne moči, ni presegala 2K, kar pomeni, da je bil efekt gretja in s tem spremljajočih pojavov zanemarljiv. Za potrditev sem v izbranih točkah meril s tokom 0,1 A in 2 A, in dobil identične vrednosti napetosti. Zaradi pričakovane časovne odvisnosti kontaktne napetosti, sem le-to spremljal z natančnim voltmetrom (Keithley 197) in pisalnikom, drugi voltmeter (Keithley 195 A) je služil za vnos podatkov v računalnik za nadaljno obdelavo.

### 3 Rezultati

Navidezno stično ploskev sem določil z meritvijo sledi diamantnih zrn, kjer se je folija dotikala krogle, **slika 4**. Pri največjem tlaku 1 bar in razdalji med podporami ( $a/2r_0$ ) = 6, je bil premer navidezne stične ploskve  $1,3 \pm 0,05$  mm. Enako veliko navidezno ploskev sem dobil tudi iz oblike profila, ki se je na omenjeni razdalji ujemal s profilom krogle. Navidezni tlak ( $5 \cdot 10^7$  Pa) je bil tako dosti manjši od Hertzovega tlaka (območje 1 GPa), ki bi se vzpostavil, če bi namesto folije vzeli debelo ploščo ali enako kroglo. Rezultat tudi pomeni, da se je folija v okolici kontakta dokaj preoblikovala, na kontaktni ploskvi pa ni sledi kontaktiranja.

Kontaktne upornost je kljub razporeditvi stičnih mest na celotno navidezno ploskev primerljiva z upornostjo v primeru Hertzovega kontakta med jekleno kroglo in



Slika 6: Vedenje kontakta po dvakratnem obremenjevanju od 0,1 do 1 bar

Figure 6: Contact resistance versus external pressure in first two cycles from 0.1 to 1 bar

ravnino iz nerjavnega jekla. Za omenjen par bi bila kontaktne upornost za čisti površini in opisanih pogojih po formulah (1)-(3) enaka 2,4  $\text{m}\Omega$ . Eksperimentalno določena vrednost, dobljena tako, da je bila folija na zunanji strani utrjena z nekaj mm debelim Cu blokom, je dala zadovoljivo ujemanje.

Spreminjanje kontaktne upornosti s tlakom pri prvem in drugem obremenjevanju sem prikazal na diagramu **slike 6**. Nadaljnji cikli so vse bolj izenačeni med seboj, ko rečemo, da je kontakt "vseden". Za doseganje vsake kontaktne upornosti pri izbranem tlaku je bilo treba čakati razmeroma dolgo, minimalno 10 minut. Domneva je, da sta med kontaktiranjem kontaktni površini med plastično deformacijo folije lahko drseli med seboj. Mehanizma tvorbe stabilnega kontakta sta tako lahko dva:

- plastično preoblikovanje vrhov, kjer je nastopil največji tlak,
- plastični tok folije na robovih kontakta, priključevanje in deformacija kontaktov na periferiji, kar spremlja utrjevanje folije in razbremenjevanje centra kontakta.

Spremljanje dejanskega dogajanja je zaradi majhne površine kontakta težavno, zato lahko o njem sklepamo le iz podatkov, ki kažejo na območje tlakov in napetosti. Za primerjavo dinamike utrjevanja kontakta v primeru bistveno manjše kontaktne ploskve sem folijo s hrbtni strani "utdil" z mehko prispajkanim bakrenim blokom, silo sem izvajal direktno nanj. Izmerjene kontaktne upornosti so bile pri sili 70 N, ki ustreza tlaku na folijo 1 bar med 3 in 4  $\text{m}\Omega$ . Analizo spremembe tokovnic zaradi danega bloka bi bilo možno opraviti s primernim simulacijskim programom. Po oceni pa bi dolga konstrikcija morala prinesiti le rahlo povečanje. Premer navidezne stične ploskve sem tokrat lahko razbral iz odtisa na foliji ( $2r = 0,5$  mm, kar da trdoto 178 po Brinellu, merjena mikrotrdota po Vickersu pa je dala vrednost 190), saj je le ta mehkejša od krogle (HCR.63-66).

#### 4 Sklep

Določil sem električno kontaktno upornost med pozlačeno folijo iz nerjavnega jekla in gladko jekleno kroglo v razmerah, kakršne nastanejo pri evakuiranju folije, podprte s periodično razporejenimi kroglicami. Iz električnih meritev smemo sklepati na odgovarjajočo toplotno prevodnost kovinskega kontakta. S predpostavko, da je mehanika kontakta, določena predvsem z lastnostmi folije, enaka tudi v primeru enako gladke keramične (in podobna v primeru steklene) krogle, moremo napovedati tudi toplotno prehodnost le tega.

Rezultat je eden od manjkajočih podatkov pri dimenzioniranju podporja, to je velikosti in gostoti krogel v evakuiranem VPI<sup>6</sup>. Le ta je ena od možnih rešitev izde-

lave tankih izolativnih struktur z navidezno prevodnostjo pod 4 mW/m.K, kar je skoraj za velikostni razred boljše kot pri materialih, ki so v uporabi danes.

#### 5 Literatura

- <sup>1</sup> D. Benson, T. Potter: Compact vacuum insulation embodiments, *USA patent* No. 5 107 649, 1992
- <sup>2</sup> K. L. Johnson: Contact mechanics, Cambridge University Press, 1985
- <sup>3</sup> C. K. Chan, C. L. Tien: Conductance of Packed Spheres in Vacuum, *J. Heat Transfer*, 2, 1974
- <sup>4</sup> K. L. Johnson, J. J. O'Connor, A. C. Woodward: The effect of the indenter elasticity on the Hertzian fracture of brittle materials, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 334, 1973
- <sup>5</sup> R. Mougiriot: Fracture indentation beneath flat and spherical punches, *J. Mater. Sci.*, 20, 1985
- <sup>6</sup> V. Nemanič: Vacuum insulating panel, *Vacuum*, 46, 1995, 8-10