

Vakuumska ploskovna izolacija - Kovinska alternativa ekološko oporečnim izolacijskim penam

Vacuum thermal insulating panel - Metal alternative for blown foams containing CFC compounds

V. Nemanič, IEVT, Teslova 30, Ljubljana, Slovenija

Predstavljene so ocene o tehnoloških možnostih realizacije in potencialnih prednostih sodobnejših izolacij, ki so po toplotni prevodnosti učinkovitejše in ekoloških merilih sprejemljivejše. Primerjava lastnosti kaže, da bodo za intenzivnejšo izolacijo naprav posebno zanimive t. i. vakuumske izolacije. S tem imenom so mišljene izvedbe, pri katerih je med stenama, bodisi med podporjem ali nasutjem, znižan tlak. Skrbneje je obdelana izvedba, kjer podporje predstavljajo diskretni distančniki, potreben pa je visoki vakuum. Analiza prispevkov sevanja, kondukcije in konvekcije kaže, da bi bil panel z visoko izolativnostjo zanimiv izolativni element. Današnje napovedi uporabnosti temeljijo še na skromnih praktičnih izkušnjah. Omejitve se kažejo predvsem pri ceni in neobvladanih robnih pojavih, ki znatno znižujejo vrednost izolativnosti zaradi samega pravokotnega prevajanja.

Ključne besede: vakuumski izolacijski panel, učinkovitejša izolacija, ekološka primernost.

Theoretical aspects and technological possibilities for realization of new types of evacuated insulation, more energy efficient and environmentally acceptable, are given. Three main contributions to heat transfer are compared: radiation, conductivity and convection of residual atmosphere. From this analysis it can be seen that low pressure and vacuum insulating elements will find application in devices, where their energy efficiency is mainly determined by heat flow through the walls. From technological point of view, all novel products can be realized with procedure steps, used in known vacuum practice. Further comparison regarding economic benefits against blown foams, nowadays widely used in insulating industry, can be made when environmental costs of all alternatives are also compared.

Key words: vacuum insulating panel, energy efficient element, ecologic benefits.

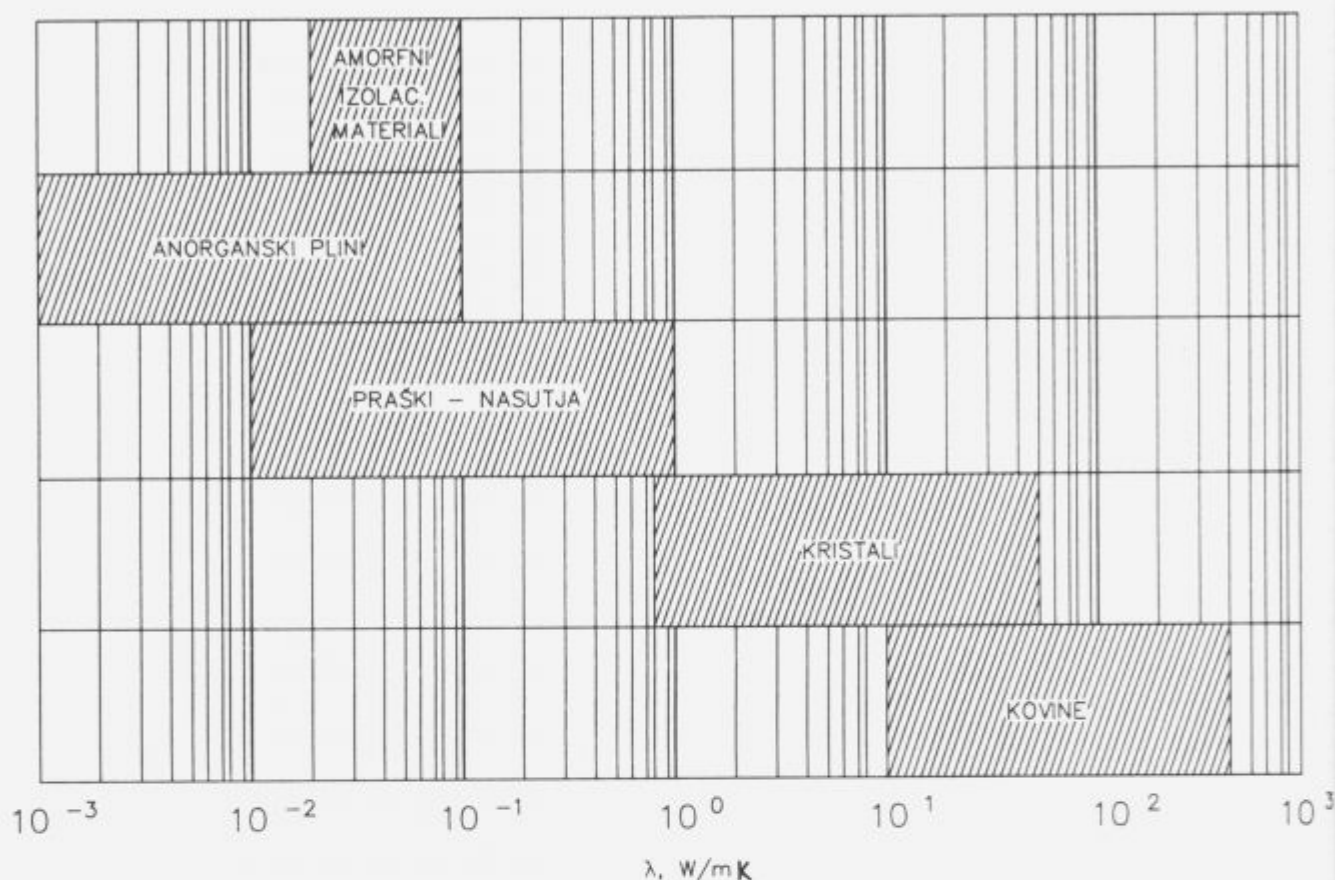
1 Uvod

Velik delež energije, ki jo potrebujemo za ogrevanje, ohlajanje in pri termični obdelavi v tehnoloških procesih, predstavlja v končni fazi strošek, v katerem le redko prepoznamo slabo učinkovitost toplotne izolacije. Širšo uporabo izolacijskih materialov v različne veje človekove dejavnosti je narekovala od začetka sedemdesetih let t.i. imenovana naftna kriza. Zmanjšanje porabe energije naj bi dosegli ob čim manjšem padcu v kvaliteti življenja in izdelkov. Ostrejšim standardom za izkoristek naprav in kvaliteto izolacijskih materialov od gradbeništva do avtomobilske industrije je prva ugodila kemijska industrija z uvajanjem poliuretanskih pen. Njihov stranski učinek se je začel kazati z odkritjem ozonske luknje, za katero pa kratkoročne rešitve še nimamo. Trenutno so okolju povsem prijazni materiali dragi naravni materiali s svojimi poznanimi omejitvami, novi principi in novi materiali pa se le počasi prebijajo v proizvodnjo večjih razsežnosti.

2 Predstavitev izolacijskih materialov

Vsi poznani polni trdni materiali so kot izolatorji neprimerni, saj so njihove prevodnosti kljub dokajšnjim razlikam med njimi, prevelike, **tabela 1**. Bistven napredek dosežemo z preoblikovanjem polnih materialov v strukturo vlaken ali mikrovlaknen (volne) z vlečenjem skozi šobe, ali pa s pripravo polimeriziranih pen. V obeh primerih je gostota materiala nizka. Učinek zmanjšane prevajanja dosežemo na račun podaljšanja prevodne poti in večjega deleža prevajanja ujetega plina, navadno zraka, ^[1]. Pri penastih materialih ima ujeti plin lahko veliko molekulsko maso, s čimer se skupna prevodnost še dodatno zmanjša. Danes toliko osumljene plinaste spojine CFC (kloro fluoro ogljikovodiki) združujejo kar nekaj sicer dobrih lastnosti: kemijske inertnosti do polimera, vloge penilnega plina med polimerizacijo in veliko molekulsko maso. Možnost priprave pene na mestu uporabe in njene dobre mehanske lastnosti pa so prednosti, zaradi katerih bo prehod na katerikoli alternativo drag in s tehnološkega vidika odklonilen.

Tabela 1. Prevodnost trdnih snovi in plinov.
Table 1. Thermal conductivity of solids and gases



Sevanje je v volnah in penah težko določljivi prispevek zaradi vzajemne prepletenosti vseh treh mehanizmov prenosa toplote. Dokler je prisotna konvekcija in predstavlja znaten del, je preučevanje IR emisivnosti manj pomembno. Pri izolativnih panelih, v katerih lahko tlak in sestavo atmosfere spreminjamo, pa postaja izbira materialov z nizko emisivnostjo enako pomembna. Raziskave zadnjih let kažejo, da je izboljšanje izolativnosti v naslednjem desetletju pričakovati predvsem z združevanjem materialov z navedenimi lastnostmi.

3 Možne poti za izboljšanje izolativnosti

3.1 Polnenje s težjim plinom

V nadaljnjem tekstu se bomo opredelili na področje, kjer se zahteva boljša izolativnost ob sprejemljivi končni debelini. V gradbeništvu ta kriterij ni primarnega pomena, v izoliranju naprav pa zelo pogosto je. Vse naslednje izboljšave narekujejo kontrolirano sestavo oz. tlak atmosfere v izolativnem panelu, kar lahko zagotovimo le znotraj neprepustne ovojnice. Le to lahko predstavljata steni, med katerima je sicer nameščena izolacija. Najenostavnejša rešitev je, da namesto zraka z molekulske maso $M=29$ uporabimo težji plin, ki pa mora ustrezati še ostalim zahtevam, kot nestrupenost, negorljivost ipd.

Kot prvo izboljšavo ekološke primernosti omenimo zamenjavo donedavno uporabljenih CFC z ekološko sprejemljivejšimi plini iz iste družine. Rešitev je dokaj zasilna in te-

melji na predpostavki o manjši aktivnosti plina in zato o šibkejši razgradnji ozona.

Priprava poliuretanske pene z drugim penilnim plinom, npr. CO_2 , $M=44$, se zdi obetavna rešitev, saj je poslabšanje izolativnosti za dobrih 10% moč nadoknaditi ob isti masi zaradi nižje gostote. Tehnološko ta rešitev ni zrela za skorajšnji prenos v proizvodnjo, nakazuje pa tudi višje stroške za isti izolativni učinek.

Pri stekleni volni, vgrajeni med neprepustni steni, se kaže obetavna možnost polnenje z argonom, $M=40$. Dosežena je bila za približno 30% boljša izolativnost, [6]. Zahtevana tesnost ovojnice in samo uvajanje argona bosta vplivali na ceno, ki pa naj bi bila, po izglelih, sprejemljiva.

Omenimo še novo polimerno izolacijo, kjer so medprosotori, v katerih je plin, izdelani kot fino satovje. Ovojnica je dvoplastna kompozitna folija (aluminij-mylar), podobna tisti, ki jo uporabljamo danes za pakiranje živil. Polnenje z argonom ali kriptonom $M=84$ prinese izredno izboljšanje izolativnosti, kar uvršča ta tip izolacije na prvo mesto med dosedaj naštetimi, [6].

3.2 Vakuumske izolacije

Izjemne izolativne lastnosti vakuumu poznamo iz vsakdanjega življenja, saj so klasične Dewar posode nenadomestljive v tako v laboratoriju kot v gospodinjstvu. Njihova velikost je omejena

s trdnostjo steklenih sten, to je na nekaj litrov koristnega volumna. Trenutno je v fazi raziskav kar nekaj tipov izolacije, kjer je učinek povečan s pomočjo evakuiranja, to je na račun zmanjšanja prevajanja plina. Vse našteje variante, ki bodo na kratko opisane, niso "povsem" vakuumske, saj dosežejo v njih izboljšanje izolativnosti že pri delnem znižanju tlaka.

3.2.1 Evakuirana praškasta nasutja

Točkasto dotikajoča zrna v nasutjih imajo izredno slab termični kontakt, zaradi česar postajajo pri zniževanju tlaka izredno izolativna. Uporaba takšne vrste izolacije je poznana pri plaščih hranilnikov tekočih plinov, kjer je potreben tlak v območju 0,01 mbar. Zniževanje skupne prevodnosti s tlakom je dokaj odvisno od vrste uporabljenega nasutja. Pomembni sta mikroporoznost in emisivnost v UV delu spektra. Posebno dobre rezultate so dosegli z nasutji silikatnih zrn iz diatomej ali umetno pridobljenih podobnih oblik. Sedanje raziskave so potekale na vzorcih, sestavljenih iz tankih kovinskih ali kompozitnih sten, kjer je kovinska folija le v funkciji permeacijske zapore. Tlak zraka je bil znižan na nekaj mbar, [6].

3.2.2 Aerogeli

Aerogeli so že desetletja poznane snovi, ki so v zadnjem času postale zanimive kot izolativno sredstvo, sprva predvsem v prozornih sredstvih, kakršne so zasteklitve, [5]. Aerogel iz silicijevega oksida je prozorna penasta snov izredno nizke gostote. Je krhek in vodotopen, zato narekuje primerne postopke priprave in vgradnje. Zaradi izjemno majhnih zaprtih por je izredno izolativen. Do izraza pridejo namreč površinski pojavi pri akomodaciji hitrosti plinskih molekul ob trkih s steno. Učinek je povečan že pri delno znižanem tlaku v območju 100 mbar.

3.2.3 Kovinska (visoko) vakuumska ploskovna izolacija

Ta tip izvedbe je pravzaprav edini, v katerem je uporabljen visoki vakuum. Prevajanje razredčenega plina je v molekularnem režimu v primerjavi s sevanjem zanemarljivo, kar uporabljamo v že omenjenih Dewar posodah.

Visoko vakuumska ploskovna izolacija je sestavljena iz dveh tankih, po robu varjenih kovinskih sten, mestoma podprtih z distančniki, ki preprečujejo porušitev strukture zaradi atmosferskega tlaka. Kovinska ovojnica je potrebna zaradi zahtevane tesnosti strukture. Za uporabnika je zanimiva doba delovanja naprave desetletje in več, zaradi česar izpadejo iz izbora omenjene kompozitne ovojnice, ki so uporabne pri višjem tlaku. Sevalni del prenosa toplote je v strukturi majhen zaradi nizke emisivnosti obeh notranjih površin. Prevajanje preko podporja je ob primerni izbiri materialov in konstrukcije prav tako majhno.

Deleži sevanja, konvekcije in prevajanja

Toplotni tok med dvema telesoma na različnih temperaturah je za predpostavljene hipotetični vakuum poznan. Izveden je iz Stefanovega zakona za črno telo, korigiran za sivo telo s specifično emisivnostjo, za telo s spektralno odvisno emisivnostjo pa z ustreznim integralom po intervalu, ki ga obravnavamo.

Za oceno jakosti mehanizma sevanja med dvema stenama z enako emisivnostjo ϵ v bližini sobne temperature uporabimo Stefanovo formulo:

$$j = \sigma \frac{\epsilon}{(2 - \epsilon)} (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

iz katere dobimo za deleže sevanja vrednosti, zbrane v tabeli 2.

Tabela 2. Jakost toplotnega sevanega toka med enakima stenama v odvisnosti od emisivnosti ϵ

Table 2. Radiated flux density between equal walls as a function of emissivity ϵ

ϵ	j [W / m ² K]	material
1	6.12	črno telo
0.85	4.5	steklo
0.22	0.71	nerj.jeklo
0.1	0.3	el. pol. n. jeklo
0.01	0.03	srebro

Table 3. Gostota toplotnega sevanega toka j med stenama z enako emisivnostjo $\epsilon = 0.01$ pri temperaturni razliki 40K pri različnih temperaturah

Table 3. Radiated flux density j for $\epsilon = 0.01$ and temperature difference 40K at different temperatures

T_2 [K]	T_1 [K]	j [W / m ²]
250	210	0.56
290	250	0.90
330	290	1.35
370	330	1.94
410	370	2.68

Z višanjem temperature oz. večanjem temperaturne razlike med stenama postaja delež sevanja prevladujoč, saj se tako prevajanje kot konvekcija spreminjata linearno. Oglejmo si toplotni tok obravnavane strukture za nekaj temperaturnih nivojev T_1 in T_2 in razpon $T_2 - T_1 = 40K$ iz enačbe 1. Predpostavili smo emisivnost $\epsilon = 0.01$, tabela 2. V celotnem izbranem intervalu je delež sevanja pri majhni vrednosti ϵ še v sprejemljivih mejah.

Konvekcija

Prevajanje plina med stenama z različno temperaturo je v viskoznem področju pretoka skoraj neodvisno od tlaka. Šele pri tlaku, ko se spremeni režim pretoka od viskoznega k molekularnemu, je padec prevodnosti skokovit, nakar z nadaljnjim redčenjem v molekularnem režimu linearno pada s tlakom. Pri uporabi formul je treba poznati predpostavke o povprečni prosti poti in temperaturi, uporabljene pri njihovi izpeljavi. Za nekaj milimetrov široko rezo je prispevek prevajanja plina v molekularnem režimu pretoka v primerjavi z deležem sevanja, zanemarljiv. To nam pokaže izračun po formulah za prevodnost pri nizkih tlakih, [1].

Zmanjšanje prevodnosti nastopi pri poroznih materialih z majhnimi zaprtimi celicami že pri grobem vakuumu, kar izkoriščamo pri aerogelih in nasutjih.

Tabela 4. Toplotne prevodnosti in gostote znanih izolacijskih materialov in potencialnih novih struktur**Table 4.** Thermal conductivities and densities of today widely used materials and of their alternatives

material	$\lambda \cdot 10^{-2} [W / mK]$	gostota, $[kg / m^3]$	plin, tlak, $[mbar]$
steklena volna	3,5 - 7	25	zrak
penasti poliuretan	2	30	CFC
stiropor	4,2	35	zrak
steklena volna	2,7	25	argon
penasti poliuretan	2,4	27	CO ₂
celična strukt. v Al/mylar	1	15 - 30	kripton
SiO ₂ prah v Al/mylar	0,6	190	zrak, 10
SiO ₂ aerogel v Al/mylar	0,5 - 0,7	95	zrak, 100
kovinska str. z dist.	0.57W/m ² K/panel	cca 3 kg/m ²	10 ⁻⁴

Prevajanje-kondukcija

Zmanjšanje kondukcije v penah in volnah dosežemo s podaljšanjem prevodnih poti in njihovo zožitvijo. V vakuumskih izolacijah zaradi trdostnih zahtev in zaradi možnosti črpanja ti dve rešitvi ne odgovarjata. Zanimiva pa so nasutja in diskretni podporniki, v katerih pride med elementi do točkastih kontaktov, ki predstavljajo zožitev (konstrikcijo) prevodnih poti. Po analogiji z električno je toplotna prevodnost dveh dotikajočih se krogel z radijem r_0 enaka produktu premera stične ploskve $2r_0$ in toplotne prevodnosti materiala λ_m .

$$k_i = 2 r_0 \lambda_m \quad (2)$$

Velikost stične ploskve, oziroma r_0 , je moč izračunati za model elastičnih krogel po enačbi, do katere je po teoretični analizi prišel že Hertz, [2]:

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3(1-\mu^2) F r_e}{4E}} \quad (3)$$

E je elastični, μ Poissonov modul, F je sila in r_0 radij krogle.

Pri dotiku dveh krogel ni mogoče rešiti stabilnosti stičnega mesta. Od enostavnejših možnosti minimalnega števila kroglic s stabilno konfiguracijo naredimo oceno za tri objete kroglice in na njih ležečo četrto (mikroizsek gosto zloženih plasti ploskovno centrirane kocke). Izračun velikosti stične ploskve je po formuli (4) možen, če upoštevamo, da se normalna sila razporedi enakomerno na vsa tri stična mesta. Podpor na enoto ploskve je toliko, kot je osnovnih kvadratnih ali heksagonalnih celic.

Med materiali, ki jih smemo vgraditi v visoki vakuum, izberemo tistega, ki ima najmanjšo vrednost produkta iz enačbe (2). Če primerjamo vrednosti k za enako velike kroglice iz različnih materialov, vidimo, da je smiselno izbrati tistega z najmanjšo prevodnostjo λ_m , ki nastopa v produktu kot faktor, elastični in Poissonov modul pa nastopata v enačbi (3) pod tretjim korenem. Poleg stekla so primerni materiali le še nekatere vrste keramike. Izdelava podpora z manjšo prevodnostjo od dveh monoplasti, ki smo jih vzeli za zgled, je možna tudi z zlaganjem "monoplasti" dotikajočih se krogel. Tak način ima prednosti pred nasutjem, saj ostaja dovolj prostora za črpanje do visokega vakuumu. Problematika nasutij je

obdelana za nizkotemperaturno področje v [2],[3] in za grob vakuum v [6].

Vsako, ki se ukvarja z vakuumskimi spoji, se zaveda, da je dolžina varjenega spoja nekaj decimetrov, s tesnostjo boljše od 10⁻¹⁰ mbar.l/s resen tehnološki izziv. Visokovakuumska ploskovna izolacija je zanimiva v dimenzijah m² in več, torej je za kvadrat s površino 1m² potrebnega 4 m zvara. Med tehnikami varjenja nerjavne pločevine debeline med 0.05 in 0.2 mm so v vakuumski praksi uporabljajo: mikroplazemsko, lasersko in točkasto kolutno varjenje. Varjenje v zaščitni atmosferi zagotavlja manjšo možnost pojavljanja vključkov in neoksidirano površino okolice zvara. Desorpcijo s sten in podporja med vakuumiranjem lahko zmanjšamo le s primernim čiščenjem pred vgradnjo in ustreznim vakuumskim procesiranjem.

4 Sklep

Industrijska izdelava alternativnih vrst izolacij zahteva natančnejšo analizo stroškov, od cene materialov do optimalnih postopkov procesiranja, za kar je danes na razpolago še premalo podatkov. Stroške je treba opravičiti s prednostmi, ki jih prinašajo v primerjavi z današnjimi vrstami izolacij. Izposojene napovedi [4],[6] kažejo, da bi bile vakuumске izolacije s svojimi prednostmi sprejemljiva alternativa za okolju neprijazne materiale. Napravimo primerjavo med karakteristikami poznanih in novih izolacijskih materialov. **tabela 4.** Ne smemo zamolčati, da so robni pojavi, ki so pri vakuumskih izolacijah dokaj pomembni, upoštevani s pomočjo teoretične napovedi ali iz meritev na modelih. Njihov prispevek postane z večanjem ploskve relativno manjši, dodatno pa ga zmanjšamo s prekrivanjem izolacijskih ploskev, kar uporabljajo tudi sicer pri vseh vrstah izolacijskih elementov.

5 Literatura

- 1 M.Wutz, H.Adam, W.Walcher: Theory and Practice of Vacuum Technology, Fridr.Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1989
- 2 Von B. Kluge, R.Knoener: Heat transfer in packed glass spheres at low temperatures, Experimentelle Technik der Physik 31; 2, 1983, str. 169-178
- 3 C.K.Chan, C.L.Tien: Conductance of Packed Spheres in Vacuum, Transactions of the ASME, Aug.1973, str. 302-308

- ⁴ T.F.Potter, D.K.Benson: Non CFC Vacuum Alternatives for Energy-Efficient Insulation of Household Refrigerators: Design and Use, Proc.42nd Int.Appliance Technical Conf., Madison, Winsconsin, May, 1991
- ⁵ A.Nordgaard et.al.: Investigation of flat-plate monolithic silica aerogel collectors, Proc. of Fifth Int. Meeting on Transparent Insulation Technology, 24-26th May 1992, Freiburg, Germany, p.21-24
- ⁶ K.T.Feldman: Advanced insulations for refrigerated shipping containers, ASHRAE Journal, Feb.1993, str.42-46