BIBLID 0350–1426 (2006) 35:2 p. 57–61

VAKUUMSKI IZOLACIONI PANELI U ZGRADAMA. TERMOHIGRIČNO PONAŠANJE I MEHANIZMI STARENJA

Vakuumski izolacioni paneli (VIP) predstavljaju visokokvalitetnu toplotno-izolacionu komponentu nedavno uvedenu u građevinsku tehnologiju. Njihova visoka termička otpornost čini ih pogodnim za primenu tamo gde se traži i tanak i energetski efikasan omotač zgrade. Koriste se, na primer, na krovnim terasama kao i u rekonstrukciji starih zgrada sa malim prostorima za unutrašnju izolaciju. Zahvaljujući vrlo maloj provodljivosti vakuumiziranog jezgra i vrlo visokoj provodljivosti aluminijumskih slojeva u graničnom filmu obmotanom oko njih, ovi paneli predstavljaju strogo nehomogeni materijal. Bočni toplotni gubici, ivični efekti i uticaj veličine panela na njih, ispitivani su i eksperimentalno i numerički. Parna zaptivenost i veliki temperaturni gradijent koji nastaju u VIP-u, bili su problemi koji su dalje istraživani merenjima na licu mesta. Dobijeni rezultati su bili korišćeni za ocenu paralelno izvedene numeričke analize. Razmatrani su i mehanizmi starenja pod tipičnim naglašenim uslovima, pomoću razaranja izazvanog temperaturom i vlažnošću. Takođe su ispitane procene kriterijuma dotrajalosti i odgovarajućeg eksploatacionog veka. Na kraju, ispitane su specijalne primene ovih panela u zaštićenim vrućim kutijama, pa upoređene sa odgovarajućom numeričkom analizom. Ovaj rad sadrži rezime multidisciplinarnih istraživanja izvedenih u EMPA-i, u okviru međunarodnog istraživačkog programa Međunarodne agencije za energiju (IEA), Aneksa 39 – "Visokokvalitetna toplotna izolacija u građevinskim sistemima".

KLJUČNE REČI: vakuumski izolacioni panel; termohigrično ponašanje; mehanizmi starenja; omotač zgrade

K. GHAZI WAKILI, H. SIMMLER, S. BRUNNER, T. NUSSBAUMER, B. BINDER, EMPA Materials Science & Technology, Laboratory for Applied Physics in Buildings, Duebendorf, Švajcarska

VACUUM INSULATION PANELS IN BUILDINGS. THERMO-HYGRIC BEHAVIOUR AND AGING MECHANISMS

Vacuum insulation panels (VIP) represent a high performance thermal insulation component recently introduced into building technology. Their high thermal resistance makes them suitable for applications where both slim and energy efficient building envelopes are required. This is the case e.g. for roof terraces as well as for retrofit of old buildings with little space for internal insulation. Due to the very low conductivity of the vacuum-packed core and the very high thermal conductivity of the aluminium layers in the barrier film wrapped around them, VIP's represent a strongly non homogeneous material. Lateral heat losses, edge effects and the influence of the panel size on them were investigated both experimentally and numerically. The vapour tightness and the large temperature gradient occuring across the VIP's were further issues that were investigated by in situ measurements. The results hereof were used for the evaluation of the numerical analysis done in parallel. Aging mechanisms under typical stress conditions were also tackled by means of temperature and humidity induced deterioration. End-of-life criteria and respective service life estimates were investigated as well. Finally, some special applications of VIP's were studied in the guarded hot box and compared with the respective numerical analysis. This paper is a summary of multidisciplinary investigations performed at EMPA within the framework of an international research programme of the International Energy Agency (IEA), Annex 39 – "High Performance Thermal Insulation in Building Systems".

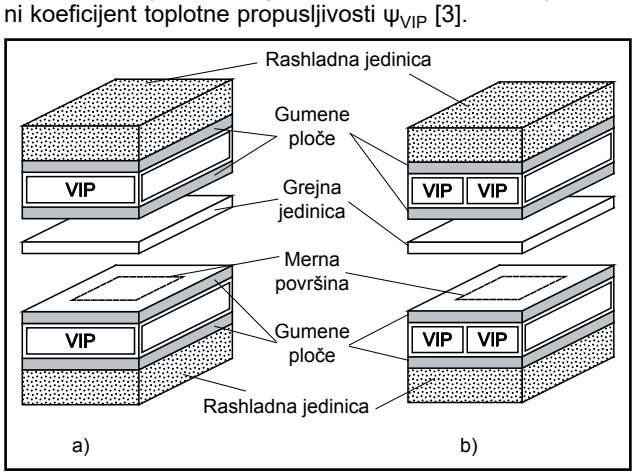
KEY WORDS: vacuum insulation panels; thermo-hygric behaviour; aging mechanisms; building envelope

U poslednjoj deceniji, vakuumski izolacioni paneli (VIP) doživeli su povećanu naklonost građevinske industrije, arhitekata i građevinskih projektanata – u traganju za tanjim i efikasnijim toplotnim izolatorima. VIP se sastoji od mikroporozne sredine koja se održava pod vakuumom pomoću gaso- i vlago-nepropustljivog graničnog omotača. Te dve komponente neprekidno su razvijane iz otvoreno-ćelijskog PUR (poliuretana) i XPS (ekstrudiranog polistirena), do dimljenog silicijum-dioksida za jezgro materijala i od tankog metala ili plastičnih ploča do aluminijumom presvučene višeslojne folije za granični omotač.

ECBCS – Energy Conservation in Buildings and Community Systems Međunarodne agencije za energiju (IEA) započela je 2001. program istraživanja i razvoja visokokvalitetnog toplotno-izolacionog materijala (Aneks 39), koji je završen u septembru 2005. Konačni izveštaji [1 i 2] (na raspolaganju su kod operativnog agenta, M. Erba, Dr. Eicher + Pauli AG 4410-Liestal Switzerland. Sledi kratak prikaz priloga EMPA-e, Švajcarska, tom programu.

Termičke karakteristike

Sa termičke tačke gledišta, VIP je strogo nehomogeni materijal, zbog veoma male toplotne provodljivosti njegovog vakuumski pakovanog jezgra od 0,004 do 0,008 W/(m·K), u zavisnosti od uključenja efekata starenja i vrlo visoke toplotne provoljivosti slojeva aluminijuma od 230 W/(m·K) u njegovom graničnom omotaču. Bočna strujanja toplote na površine VIP-a su od značaja i čine određivanje efektivne toplotne provodljivosti VIP-a i prolaza toplote (U-vrednost) VIP-a koji sadrži građevinske detalje, složenije nego što je slučaj kod homogenih toplotno-izolacionih materijala. Da bi se eksperimentalno odredila efektivna toplotna provoljivost VIP-a, korišćena su dva različita ansambla VIP-a kao uzorci za merenje u zaštićenoj vrućoj ploči [3]. Prvo je (sl. 1a) meren neiskrivljen centar panela λ_{cop} odnosno otpor R_{VIP}. A zatim je (sl. 1b) određen otpor $R_{VIP+joint}$. Oduzimanje ova dva otpora daje dodatni gubitak toplote kroz ivicu, tj. linearni koeficijent toplotne propusljivosti ψ_{VIP} [3].



Slika 1. Ansambl uzorka u zaštićenoj vrućoj ploči (nije u razmeri); a) postavka za merenje vrednosti neiskrivljenog centra panela; b) postavka za merenje ivičnog efekta

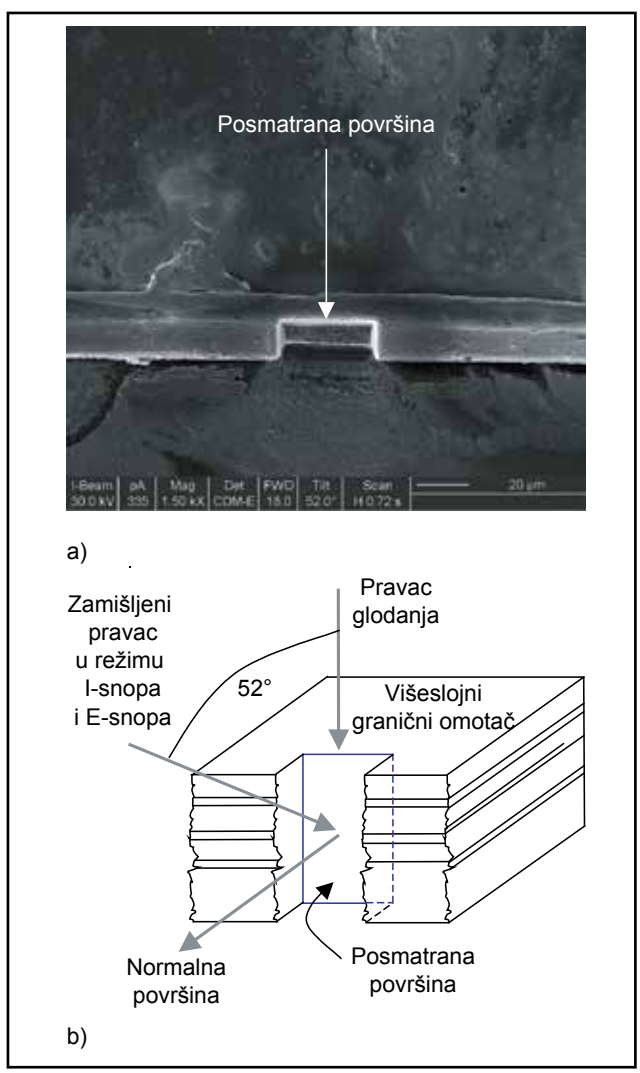
Ne treba govoriti da efektivna toplotna provodljivost λ_{eff} ne zavisi samo od debljine samog panela i aluminijuma u graničnom omotaču, već i od veličine njegovog obima. Što je obim veći, veća je količina ivičnog gubitka toplote i obratno. To znači da bi za toplotnu optimizaciju najviše odgovarali VIP-ovi sa velikim površinama i malim obimom. Izmerene veličine za VIP-ove sa različitim graničnim omotačima nevedene su u tabeli 1.

Tabela 1. Efektivna toplotna provodljivost VIP-ova kvadratnih dimenzija 1 x 1 m

VIP	Debljina [mm]	Aluminijum [mm]	λ_{cop} [W/mK]	Ψ_{VIP} [W/mK]	λ_{eff} [W/mK]
Tip A	20	$0,16 \times 10^{-3}$	$4,14 \pm 0,08 \times 10^{-3}$	$7,0 \pm 1,6 \times 10^{-3}$	$4,70 \pm 0,08 \times 10^{-3}$
Tip B	20	$0,34 \times 10^{-3}$	$3,91 \pm 0,08 \times 10^{-3}$	$9,2 \pm 1,6 \times 10^{-3}$	$4,65 \pm 0,08 \times 10^{-3}$
Tip C	18	$8,00 \times 10^{-3}$	$3,95 \pm 0,08 \times 10^{-3}$	$52,4 \pm 3,3 \times 10^{-3}$	$7,73 \pm 0,08 \times 10^{-3}$

Strukturna analiza folije

Istraživane su dve već pomenute vrste – A i B – graničnog omotača (svaka sa tri sloja aluminijuma), pomoću fokusiranog snopa jona koji obezbeđuje adekvatno određivanje efektivne debljine aluminijumskih slojeva [4]. Dodatne informacije su prikupljene o prekidu na površini između aluminijuma i polimernog filma u njegovoj blizini ili adhezivnog sloja kao i o poremećajima u samom sloju aluminijuma.



Slika 2. Ivica uzorka graničnog omotača viđena pomoću I-snopa sa pravcem glodanja pod nagibnim uglom od 52°. Površina koja nas zanima (desno) skuplja se u jednu svetlu liniju (levo) kada se gleda u pravcu glodanja

Slika 2a pokazuje uzorak ivice viđene pomoću snopa jona orijentisanog u pravcu glodanja. Slika 2b predstavlja položaj slojeva s obzirom na poprečni presek i različite pravce snopa. Istraživanje poprečnog preseka izvršeno je ili pomoću snopa jona ili snopa elektrona.

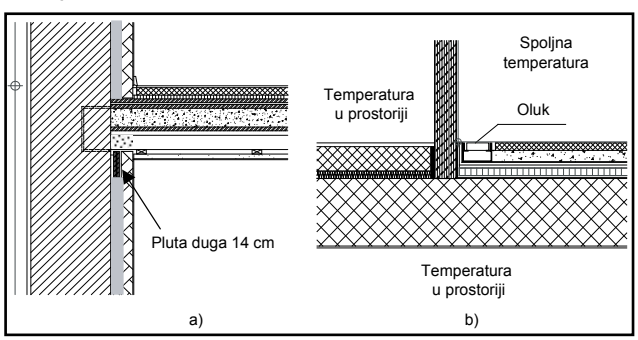
Rezime deklarisane i izmerene debljine sloja aluminijuma za obe vrste graničnih omotača nalazi se u tabeli 2. Izmerene vrednosti slojeva aluminijuma izdvojene su iz E-snopa uobličenih samo na dva različita mesta glodanja za oba laminata. Da bi se dobile reprezentativne vrednosti, korišćene su slike uveličane između 50 i 200 hiljada puta.

Tabela 2. Debljina 3 aluminijumska sloja u višeslojnom graničnom omotaču prema proizvođačima, upoređena sa vrednostima određenim pomoću E-snopa

Laminat	Sloj	Deklarisana debljina [μm]	Izmerena debljina [μm]	Uveličavanje u 1000 x
Tip A	1	0,030	0,052 ± 0,008	150-200
	2	0,030	0,058 ± 0,009	150-200
	3	0,030	0,052 ± 0,008	150-200
Tip B	1	0,100	0,115 ± 0,010	150-200
	2	0,100	0,115 ± 0,010	150-200
	3	0,100	0,115 ± 0,010	150-200

Građevinski detalji koji sadrže VIP-ove

Postoji veliki broj delova zgrade gde primena tankih ali efikasnih slojeva toplotne izolacije, tj. VIP-ova, ima veliki značaj [5]. Neke oblasti primene, kao što su modifikacije (sl. 3a) i terase (sl. 3b), već su isprobane, dok se druge, kao što su krovne konstrukcije, istražuju [6], ili se njihovo ugrađivanje planira.



Slika 3. a) Masivni kameni zid modifikovan primenom VIP-ova na unutrašnjoj strani; b) deo terase sa kontinualnim prelazom između unutrašnjeg i spoljašnjeg sprata. Slojevi VIP-a na slici su prikazani sivom bojom

Da bi se predvidelo termičko ponašanje delova zgrade, uključujući površine prekrivene VIP-ovima, potreban je odgovarajući numerički model koji je istovremeno i jednostavan i tačan. Jedan takav model je prikazan na sl. 4, gde je granični omotač sveden na troslojni film, a ivični efekat između dva susedna VIP-a uzet je u obzir preko d_{add}. Ta dodatna (fiktivna) debljina određuje se prilagođavanjem numeričkog proračuna sa eksperimentalnim rezultatima koje smo već objasnili, tj. kalibracijom proračuna upoređenjem sa merenjima. Ceo niz merenja i kalibracija odgovarajuće numeričke analize treba da budu ponovljeni za različite debljine panela VIP-ova.

Tabela 2 sadrži rezime proračuna linearne toplotne provodljivosti–vrednosti ψ_{detail}, za oba dela slike 3 za dve debljine VIP-a, pomoću odgovarajućih kalibrisanih vrednosti d_{add}.

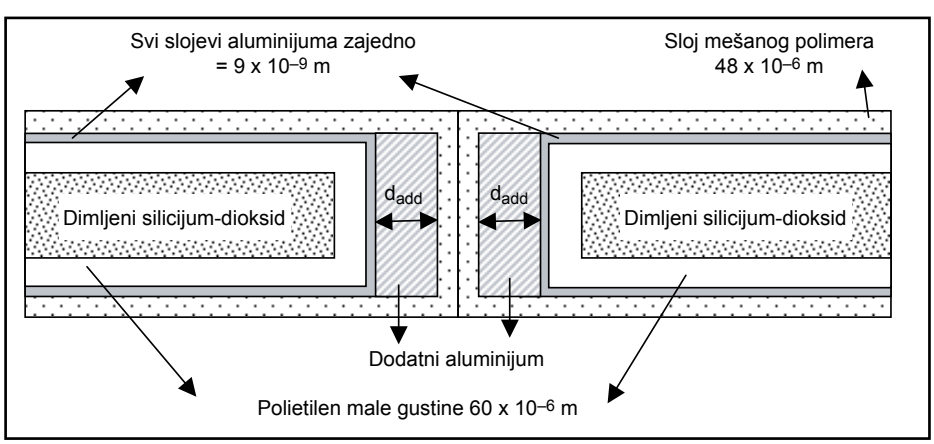
Sledeći primer je sistem sa drvenim vratima sa VIP-ovima. Takva vrata su ispitivana i eksperimentalno i numerički [7], da bi se odredio uticaj oštećenih VIP-ova na termičke karakteristike celog sistema vrata. Za vrednovanje izračunate raspodele temperatura na površinama, korišćen je sistem infracrvenog prikazivanja. Utvrđeno je da najsigurnija primena VIP-a kao i primena koja najviše obećava, obuhvata njihovu primenu iza zaštitnog sloja, npr. integrisanog sa vratima. Najveća prednost ove primene je znatno povećanje izolacionog učinka bez promene ukupne debljine vrata.

Tabela 2. Linearna toplotna provodljivost oba dela slike 3

Deo	Debljina VIP-a [mm]	Vrednost U (zid/pod) [W/m^{2}K]	ψ_{detail} [W/mK]
Zid (sl. 3a)	30	0,25	0,37
	20	0,35	0,36
Pod (sl. 3b)	30	0,25	0,12
	20	0,35	0,13
Ovo se odnosi na VIP-ove čija je dužina 1,3, a širina 0,6 m.			

Mehanizam starenja

U osnovi, mehanizmi starenja postoje na nivou materijala i s obzirom na svojstva sistema VIP-a. U lit. [8] ukratko je prikazan potencijal starenja graničnih materijala. U rezimeu, laminatna višeslojna visoka granica obično ne treba da bude izložena temperaturama iznad 60°C, kao ni visokoj vlažnosti. Za najosetljivije polimerne komponente polietilena, kada su stabilizovane fenolnim antioksidansima, prihvatljive su samo kratkotrajne temperature od 80°C. Visoka vlažnost, naročito istovremeno sa visokom temperaturom, može izazvati oksidaciju slojeva aluminijuma i degradaciju adhezivnih slojeva poliuretana hidrolizom. Osnovni nivo vlage ili vode u čovekovoj okolini mora biti ograničen na vrednost pH manju od 8,5, koju treba razmatrati naročito ako se beton ili druge alkalne materije nalaze u neposrednoj blizini. Zaštićeni od ovih uticaja, ne očekuje se skraćenje veka upotrebe VIP-a zbog starenja graničnih materijala i jezgra od silicijum-dioksida koje je vrlo stabino u temperaturnom opsegu kakav je u zgradi pri korišćenju njenih prostora.



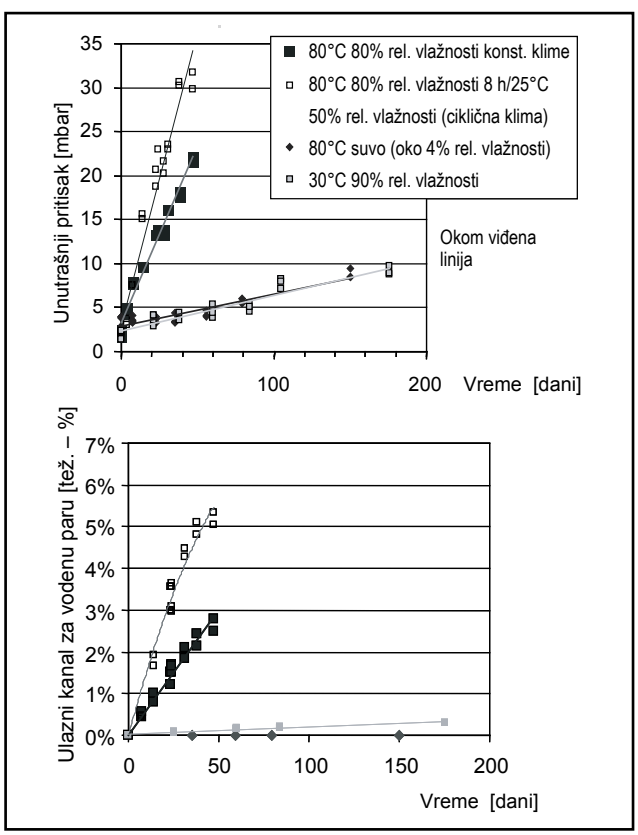
Slika 4. Uproščeni model za dva susedna VIP-a korišćen za numeričku analizu

Pošto se toplotna provodljivost jezgra SiO_2 povećava otprilike po faktoru 5 između početnog pritiska (1 mbar) i standardnog atmosferskog pritiska, prodor gasa kroz omotač je viđen kao dominantan mehanizam starenja VIP-a. Međutim, taj jednostavni pogled treba proširiti na još nekoliko aspekata: i) povećanje stope prodiranja na višim temperaturama i/ili vlažnosti ubrzaće povišenje pritiska; ii) povećanje prodornosti ivičnih područja – uglavnom zbog veće gustine de-

fekata na ivicama, u naborima, uglovima i zaptivnim delovima – može takođe dovesti do većih vrednosti prodornosti panela od izračunatih baš zbog nenapregnutog ravnog filma. Zbog toga je teško izvesti realne podatke o starenju VIP-a iz svojstava prodornosti filma omotača, ali se mora eksperimentalno istraživati sa ansamblima panela. Kao zaključak, moraju se uzeti u obzir različiti doprinosi efekata sa površine i iz obima.

Higrotermički eksperimenti starenja

Pošto su toplota i vlaga najvažniji i neprekidni faktori koji utiču na VIP u svakoj primeni u zgradi, eksperimenti ubrzanog starenja usmereni su na povišenu temperaturu i vlažnost. Da bi se proverio uticaj širokog opsega uslova, prva serija je izvedena na malim VIP-ovima (250 x 250 mm^2), na maksitnalnoj radnoj temperaturi koju je proizvođač odredio – 80°C, uz relativnu vlažnost od 80% u isto vreme (80°C/80% rel. vl.) [9].



Slika 5. Povišenje unutrašnjeg pritiska (a) i sadržaja vlage (b) u "malom" VIP-u na povišenoj temperaturi i povišenom pritisku. Merenja su izvršena na sobnoj temperaturi nakon sniženja temperature uzorka za nekoliko sati

Granični materijal je bio MF3, a trostruki metaliziran polimerni laminat proizveden je 2002. Radi poređenja, ciklični uslovi i izloženost temperaturi od 80°C na parnom pritisku ambijenta, takođe su ispitani. Ispitivanja koja su usledila izvršena su na 30°C/90% rel. vl., sa željom da se pokrije razuman opseg primene. Kao najdirektiniji pokazatelji starenja, određeni su masa (merenjem težine) i unutrašnji pritisak (određivanjem ravnotežnog pritiska u sobi za depresurizaciju) u redovnim vremenskim intervalima. Rezultati su prikazani na sl. 5. Na 80°C/80% rel. vl. očigledno je da se pritisak povišava, kao što je akumulacija vlage suviše brza u trajnijoj primeni. Kao što se na slici vidi, ciklični uslovi (8 sati na 80°C/80% rel. vl. ↔ 4 sata na 25% rel. vl.)

Tabela 3. Upoređenje izmerenih i izračunatih podataka o starenju za unutrašnju i spoljašnju površinu sloja VIP-a od 20 mm na ravnoj krovnoj konstrukciji

Veličina panela	Količina pri $T_{effective}$ [mbar/god.]	Proračun na bazi podataka o temperaturi (1 god.)			Merenja nakon 424 d.	
		Unutr.	Spoljni	Srednji		
25 x 25 x 2 cm^3	pa	2,72	2,89	2,8	2,9	±0,2
50 x 50 x 2 cm^3	pa	2,04	2,17	2,1	1,9	±0,2
[%-masa/god.]						
25 x 25 x 2 cm^3	X_{wa}	0,26%	0,29%	0,28%	0,22%	±0,04%
50 x 50 x 2 cm^3	X_{wa}	0,15%	0,17%	0,16%	0,13%	±0,02%

čak su stroži nego pri konstantnoj izloženosti na 80°C/ 80% rel. vl. Stope povišenja pritiska i sadržaja vlage su skoro udvostručene.

Veća prodornost u cikličnim uslovima može se pojaviti ili usled smicajnog napona između polimernih i metalnih slojeva, usled loše kombinacije svojstava toplotne ekspanzije, ili/i cikličnom kondenzacijom vode na "hladnim" površinama VIP-a koja kasni u periodima povećanja temperature i vlažnosti zbog toplotne inercije materijala jezgra.

Jasna korelacija postoji između spoljnog pritiska pare i ekstrapoliranih godišnjih stopa povećanja unutrašnjeg pritiska i sadržaja vlage, ukazujući na to da je parni pritisak glavna pogonska sila za degradaciju. Drugi pokazatelj velike osetljivosti na vlagu je ponašanje na 80°C i nizak (ambijentni) pritisak pare: stopa povišenja pritiska je mnogo manja, ali još uvek iznad 10 mbar/god. Sadržaj vlage u tom slučaju ostaje blizak nuli. Na 30°C/90% rel. vl. stopa povišenja pritiska je slična.

Posmatranje na mestu

Pošto sa instaliranim VIP-ovima do sada nema mnogo iskustva, potrebno je verifikovati projekcije njihovog korišćenja na laboratorijskoj osnovi, pomoću podataka iz stvarne primene. Izložićemo merenja VIP-a na izolovanoj ravnoj krovnoj konstrukciji (sl. 3b), koja su bila praćena od juna 2004. do oktobra 2005. [6]. Radi poređenja rezultata posmatranja sa podacima na laboratorijskoj osnovi o starenju, postupak izračunavanja Arenijusove izmerene efektivne temperature $T_{effective}$ radi određivanja očekivane godišnje stope povišenja pritiska p_a (sume parcijalnog pritiska kiseonika, azota i vodene pare) i stope godišnjeg povećanja mase X_{wa} (ulazni kanal za vodu), primenjen je na podatke dobijene merenjem [8, 9].

U osnovi, i rezultati starenja dobijeni merenjem na mestu i oni dobijeni laboratorijskim putem sugerišu eksploatacioni vek od nekoliko decenija. U primeni na zgradama, treba uzeti u obzir dugotrajno povećanje toplotne provodljivosti. Povećanje zavisi od svojstava barijere, dimenzija panela i graničnih uslova. Za primenu na opisanom ravnom krovu, dugotrajna vrednost od 7 x 10^{-3} W/(mK) može biti pogodna za stvarnu barijeru SiO_2–VIP na bazi polimera.

Zaključci

Istraživanja u EMPA-i i drugim laboratorijama pokazuju da novi visokoefikasni toplotno-izolacioni paneli bazirani na evakuisanom dimljenom silicijum-dioksidu zatvoreni u višestruko metaliziranoj barijeri od laminatnog polimera, imaju potencijal dovoljan da zadovolje zahteve i u pogledu dugotrajne primene na zgradi i efekte minimalnog toplotnog mosta kroz ivičnu zonu. Eksploatacioni vek od nekoliko decenija može se očekivati u pogodnim konstrukcijama, pod uslovom da se u sredini u kojoj je VIP održavaju umere-

ni uslovi temperature i vlažnosti, kao i da ne postoje druga značajnija (mehanička, hemijska) naprezanja. Prvi podaci dobijeni posmatranjem izgleda da opravdavaju primenu jednostavnih modela predviđanja eksploatacionog veka koji su na raspolaganju. Međutim, oni daju samo grubu procenu prodora gasa, pa su potrebni eksperimentalni podaci o njihovom starenju dobijeni merenjem panela. Poboljšanja materijala barijere su i dalje potrebna, koliko zbog smanjenja brzine degradacije i odgovarajućeg povećanja projektnih vrednosti toplotne provodljivosti, toliko zbog povećanja opsega prihvatljivih higrotermičkih uslova ili drugih pritisaka na VIP.

Autori zahvaljuju Swiss Federal Office of Energy na delimičnom finansiranju ovog rada.

Literatura

[1] *** Vacuum Insulation Panels – Study on VIP-components and panels for service life prediction of VIP in building applications (Subtask A), IEA / ECBCS Annex 39, Final report. www.vip-bau.ch.

[2] *** Vacuum Insulation in the building sector – Systems and applications (Subtask B), IEA / ECBCS Annex 39, Final report. www.vip-bau.ch.

[3] **Ghazi, K. Wakili, R. Bundi and B. Binder,** *Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels*, Building Research and Information 32 (2004) 293–299.

[4] **Brunner, S., Ph. Gasser, H. Simmler and K. Ghazi Wakili,** *Investigation of multilayered aluminium-coated polymer laminates by focused ion beam (FIB) etching,* Surface and Coating Technology, accepted 2005.

[5] **Ghazi, K. Wakili, T. Nussbaumer and R. Bundi,** *Thermal performance of VIP assemblies in building constructions*, Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, Duebendorf – Zuerich, Switzerland, 2005, 131–138.

[6] **Brunner, S. and H. Simmler,** *Monitoring of VIP building applications*, Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, Duebendorf – Zuerich, Switzerland, 2005, 35–41.

[7] **Nussbaumer, T., R. Bundi, Ch. Tanner and H. Muehlebach,** *Thermal analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels,* Energy and Buildings 37 (2005) 1107–1113.

[8] **Simmler, H. and S. Brunner,** *Vacuum insulation panels for building application basic properties, aging mechanisms and service life,* Energy and Buildings 37 (2005) 1122–1131.

[9] **Simmler, H. and S. Brunner,** *Aging and service life of VIP in buildings,* Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, Duebendorf – Zuerich, Switzerland, 2005, 15–22.

kgh