

Primljen / Received: 26.11.2013.

Ispravljen / Corrected: 4.6.2014.

Prihvaćen / Accepted: 14.8.2014.

Dostupno online / Available online: 10.11.2014.

Mjerenje fizikalnih svojstava poliuretanske žbuke

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Milena Kušnerová**, dipl.ing.fizike
VŠB - Tehničko sveučilište u Ostravi
Rudarsko-geološki fakultet
Fakultet za metalurgiju i materijale
milena.kusnerova@vsb.cz



Izv.prof.dr.sc. **Jan Valíček**, dipl.ing.fizike
VŠB - Tehničko sveučilište u Ostravi
Rudarsko-geološki fakultet
Fakultet za metalurgiju i materijale
jan.valicek@vsb.cz



Dr.sc. **Marta Harničárová**, dipl.ing.stroj.
VŠB - Tehničko sveučilište u Ostravi
Rudarsko-geološki fakultet
Fakultet za metalurgiju i materijale
marta.harnicarova@vsb.cz

Prethodno priopćenje

Milena Kušnerová, Jan Valíček, Marta Harničárová

Mjerenje fizikalnih svojstava poliuretanske žbuke

Fizikalna svojstva građevnih materijala mogu se definirati pomoću koeficijenta materijala kao što su srednja gustoća, specifični toplinski kapacitet, toplinska provodljivost i toplinska difuzivnost. U radu je prikazano ispitivanje fizikalnih svojstava novorazvijenog materijala (poliuretanske žbuke) nerazornim postupkom. Također je provedeno određivanje svojstava komparativnih uzoraka izrađenih od porobetona pri čemu je primijenjena ista metoda kao i isti uvjeti ispitivanja. Za određivanje toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta razvijena je i verificirana nova komparativna metoda za čije je provođenje razvijen novi kalorimetrijski uređaj.

Ključne riječi:

poliuretanska žbuka, nova metoda mjerenja, specifični toplinski kapacitet, toplinska vodljivost, toplinska difuzivnost

Preliminary note

Milena Kušnerová, Jan Valíček, Marta Harničárová

Measurement of physical properties of polyurethane plaster

Physical properties of building materials can be defined by material coefficients. The material coefficients examined were: coefficient of mean density, coefficient of specific heat capacity, coefficient of thermal conductivity, and coefficient of thermal diffusivity. Physical properties of a newly-developed material (polyurethane plaster), were subjected to non-destructive analysis. The same method and same conditions of measurement were applied to measure the properties of comparative samples made of Ytong. In order to measure the coefficient of thermal conductivity and coefficient of thermal capacity, a new comparative method was designed and verified and also a new calorimetric apparatus was used.

Key words:

polyurethane plaster, new method of measurement, specific heat capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity

Vorherige Mitteilung

Milena Kušnerová, Jan Valíček, Marta Harničárová

Messung physikalischer Eigenschaften von Polyurethanpflaster

Physikalische Eigenschaften von Baumaterialien können mittels Materialkoeffizienten, beispielsweise der durchschnittlichen Dichte, der spezifischen Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmediffusivität, definiert werden. In dieser Arbeit sind Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften eines neu entwickelten Materials (Polyurethanpflaster) durch zerstörungsfreie Messungen dargestellt. Des Weiteren sind die Eigenschaften an Vergleichsproben aus Porenbeton unter gleichbleibenden Versuchs- und Messbedingungen ermittelt worden. Um die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität zu messen, ist ein neues Vergleichsverfahren eingeführt und verifiziert worden, für das ein neues kalorimetrisches Messgerät entwickelt wurde.

Schlüsselwörter:

Polyurethan-Putz, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wärmediffusivität, neue Messmethode

1. Uvod

Poliuretanska žbuka je nova vrsta toplinskoizolacijske žbuke predviđene za primjenu na vanjskim i unutarnjim zidovima zgrada. Kao punilo se koristi poliuretanska pjena, nakon što joj istekne rok trajanja, u obliku zrna s najvećim promjerom od 4 mm. U [1 - 3] naveden je pravilan postupak obrade takve tvrde poliuretanske pjene i primjer primjene toplinskoizolacijske žbuke na bazi poliuretana na referentnoj građevini.

Toplinska provodljivost krutina ispitana je kao prijenos topline vođenjem (kondukcijom), bilo kao stabilno/stacionarno ili vremenski promjenljivo/nestacionarno vođenje topline. Prijenos topline se općenito definira kao neuravnotežen termodinamički proces koji se odvija u uvjetima postojanja temperaturne razlike. Toplinski tok kroz krutine je pritom definiran kao toplinski tok koji prelazi iz područja promatranog predmeta s višom temperaturom na područje s nižom temperaturom. Tijekom procesa zagrijavanja najprije se odvija faza nestacionarnog provođenja koja prelazi u stacionarnu fazu kada je postignut toplinski kapacitet materijala. Stabilni toplinski tok definiran je kao toplinski tok koji se odvija pri konstantnoj temperaturi gornje i donje površine promatranog uzorka. Odnosi između fizikalnih parametara procesa provođenja topline iskazani su Fourierovim zakonom. Prema Fourierovom zakonu, gustoća toplinskog toka izravno je proporcionalna temperaturnom gradijentu. Koeficijent materijala izveden iz ovog izravnog odnosa naziva se toplinska provodljivost. Specifični toplinski kapacitet ispitivan je kalorimetrijskom metodom. Uzorak ispitivanog materijala zagrijava se elektrootpornim grijačima u kalorimetru koji je, u načelu, toplinski izolirana posuda, kod koje je izmjena topline s okolišem minimalna. Odnosi između fizikalnih parametara procesa toplinskog kapaciteta izražavaju se kalorimetrijskom jednadžbom.

Trenutačno stanje ispitivanih parametara povezano je s klasičnim metodama mjerenja i ispitivanjem toplinskih svojstava materijala. Toplinska provodljivost je ispitivana kao prijenos topline vođenjem u određenom materijalu. Toplinska provodljivost materijala, i u stacionarnom i u nestacionarnom području vođenja topline, ima vrijednost u smislu informacija o svojstvima materijala. Po klasičnom Fourierovom zakonu, mjeri se toplina provedena kroz ispitivani materijal između paralelnih ploča; ova toplina je proporcionalna temperaturnoj razlici između dvije ploče, površini ploča i vremenu zagrijavanja, a obrnuto je proporcionalna udaljenosti između njih. Stacionarne metode mjerenja toplinske provodljivosti korištenjem kontaktnih uređaja su zahtjevnije, a vrijeme mjerenja je relativno duže nego u slučaju nestacionarnih metoda mjerenja. Međutim ova su mjerenja vrlo točna pa se stoga često smatraju standardnim mjerenjima (pod točno određenim uvjetima, jer je pouzdanost rezultata mjerenja povezana sa širinom temperaturnog intervala; osjetljivost i rezolucija uređaja su povezani s potencijalnom promjenom homogenosti i vlage materijala).

Osim toga, toplina se ispituje kao dio promjene unutarnje energije koju materijal razmijeni u dodiru s drugim materijalom

različite temperature. U tom slučaju specifični toplinski kapacitet ima informativnu vrijednost o svojstvima materijala. Specifični toplinski kapacitet se mjeri klasičnom kalorimetrijskom metodom pri čemu se mjeri količina topline koja je potrebna kako bi se promijenila temperatura uzorka, a koja je izravno proporcionalna masi materijala.

Uređaji koji su konstruirani za mjerenje toplinskih koeficijenata (za mjerenje toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta) omogućavaju izravno mjerenje, posebno gustoće toplinskog toka i temperaturne razlike.

Klasični, ali još uvijek široko korišteni uređaji, temelje se na stacionarnim metodama mjerenja korištenjem kontaktnih uređaja. Njima, prije svega, pripadaju svi uređaji s mjernim pločama prema Poensgeniu i Bocku, cilindrični uređaji prema Van Rinsumi i uređaji sfernog (okruglog) oblika prema Nusseltu.

Suvremeni uređaji u općoj uporabi temelje se na nestacionarnim kontaktnim metodama, jednostavni su, brzi, relativno precizni i sam proces mjerenja se upravlja računalom. U načelu, to su uređaji prema Fitchu, gdje se razlika u temperaturi između dva mjesta na materijalu mjeri određeno vrijeme sa stalnim vremenskim korakom (fazom). Na primjer, dobro je poznati RT uređaj za ispitivanje termo-fizikalnih svojstava u prijelaznom (nestacionarnom) stanju (eng. *Thermophysical Transient Tester RT*) koji se temelji na metodi impulsa (impuls topline emitira se na mjereni materijal, a iza materijala postavljen je senzor koji registrira toplinski odgovor materijala u određenom vremenu). Uređaj Shotherm QTM zasniva se na metodi vruće žice (mjeri se porast temperature unutar definirane udaljenosti od linearnog izvora topline smještenog unutar mjenog materijala).

Beskontaktno metode mjerenja koriste infracrvene senzore i ubrajaju se u najnovije metode mjerenja toplinskih koeficijenata. To se osobito odnosi na uređaj CFTT-05, koji se zasniva na beskontaktnoj metodi bljeska (eng. *contactless flash method*). Trenutačne vrijednosti temperature detektira infracrveni senzor postavljen iza ozračenog materijala. Iako su ove nove metode mjerenja brze, njihovi rezultati su, u usporedbi s klasičnim kontaktnim metodama, manje pouzdani.

Za izvođenje novih teorijskih relacija za izračun vrijednosti toplinskih svojstava novog izolacijskog materijala (poliuretan) pomoću novih predloženih metoda i nove opreme, kao osnovica se trebaju koristiti sljedeće standardne fizikalne relacije dane izrazima (1) do (4):

a) Srednja gustoća ρ (volumenska masa u suhom stanju):

$$\rho = \frac{m}{S \cdot d} \quad (1)$$

gdje je m - masa uzorka, S - površina stijenke uzorka, d - debljina uzorka [4].

b) Koeficijent specifičnog toplinskog kapaciteta c je, prema zakonu o očuvanju energije:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (2)$$

gdje je Q toplina isporučena zagrijavanjem na donjem dijelu uzorka, m je masa uzorka, Δt je promjena temperature materijala [4].

c) Toplinska provodljivost λ određuje se po Fourierovu zakonu kako slijedi u izrazu (3):

$$Q = \lambda \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (3)$$

gdje je Q toplina isporučena na uzorak pomoću kontaktnog grijanja pri čemu je uzorak pravilnog geometrijskog oblika (npr. ploča), Δt je promjena temperature materijala, τ je ukupno vrijeme mjerenja toplinskog toka [4, 5], S je površina stijenke uzorka, a d je debljina uzorka. Razlika u temperaturi između vanjskog grijanja i hlađenja je konstantna. Dvije sonde su postavljene u utore na gornjoj i donjoj plohi ploče na udaljenosti d kako bi se termometrom mogla zabilježiti razlika u temperaturi Δt između dviju lokacija unutar ispitnog uzorka. Nadalje, navedena temperaturna razlika u uzorku koji se ispituje nije konstantna tijekom procesa zagrijavanja. Zagrijavanje promatranoga uzorka odvija se u tri faze.

U prvoj fazi procesa zagrijavanja, na početku mjerenja, vrijednost temperature razlike Δt je nula te, ovisno o intenzitetu zagrijavanja postupno raste jer se ploča zagrijava pri promjenjivom (nestacionarnom) toplinskom toku. Period stacionarnog toplinskog toka t ne može se još odrediti.

U drugoj fazi procesa zagrijavanja, temperaturna razlika Δt postaje određena konstantna vrijednost jer ploča provodi toplinu bez daljnje apsorpcije topline. Toplinski tok kroz materijal postaje stacionaran te je temperaturna razlika Δt prikladna za točno određivanje koeficijenta λ . Period stacionarnoga toplinskoga toka τ ograničen je ostalim fizikalnim veličinama (Q , λ , S , d , Δt).

U trećoj fazi zagrijavanja, temperaturna razlika Δt počinje opadati, ploča se pregrijava. Toplinski tok kroz materijal ponovno je nestacionaran. Mjerena temperaturna razlika varira i oscilira pa su rezultati mjerenja neprikladni za precizan izračun koeficijenta λ , kao i u prvoj fazi procesa zagrijavanja. Period stacionarnoga toplinskoga toka τ je završen.

Nedostatak ove metode je u tome što je nužno da toplina zagrijavanja bude precizno određena (s obzirom na gubitak topline prema vanjskom okruženju) te je potrebno osigurati konstantnu temperaturnu razliku grijanja i hlađenja. Ova metoda je klasična laboratorijska metoda ispitivanja: aparatura je relativno skupa i vrlo teško pomična. Unatoč tome, ovom metodom mogu se dobiti vrlo dobre vrijednosti rezultata mjerenja, što je prednost. Potrebno je napomenuti da uobičajeno korištene tablice prikazuju vrijednost koeficijenta λ na sobnoj temperaturi (20°C). Ako su potrebni vrlo precizni rezultati mjerenja koeficijenta λ nepoznatog materijala, nužno je odrediti prosječnu temperaturu t_s pri kojoj stacionarni toplinski tok prolazi kroz materijal ($t_s = t_1 + \Delta t/2$). Nova predložena metoda također je zasnovana na Fourierovom zakonu o provođenju topline, prema tome zagrijavanje se treba odvijati u trima

fazama zagrijavanja koje su ranije navedene; nestacionarni, zatim stacionarni te ponovno nestacionarni toplinski tok.

S obzirom na složenost i potrebnu preciznost pri određivanju koeficijenta λ , prednost nove predložene metode mjerenja nalazi se u tome što nije potrebno kontrolirati količinu topline za zagrijavanje, stoga ni gubitak topline prema vanjskom okruženju. Nadalje, nije nužno osigurati stalnu temperaturnu razliku grijanja i hlađenja na suprotnim stranama mjernog uzorka. S obzirom na složenost i preciznost pri određivanju koeficijenta λ , nedostatak je nove predložene metode mjerenja u tome što treba imati vrlo točne podatke o koeficijentu λ referentnog uzorka i o razvoju temperature. Sljedeći korak je usporedba rezultata mjerenja procesa zagrijavanja koje se provodi u poznatom referentnom mjernom uzorku sa zagrijavanjem koje se provodi u nepoznatom mjernom uzorku (rezultati usporedbe mogu se sačuvati u računalnom programu), a mjerenja moraju biti izvedena na istom uređaju pod istim uvjetima. Prema jednadžbi (6), tada se samo dva perioda stacionarnoga toplinskoga toka i dvije vrijednosti koeficijenata toplinske vodljivosti trebaju usporediti.

Kako bismo prikladno usporili proces zagrijavanja (precizno mjerenje), mjerni uzorak (referentni i uzorci koji se ispituju) postavljen je u sustav kao u "sendvič", u točnom određenom redu koji je nepromjenjiv.

U prvoj fazi procesa zagrijavanja, na početku mjerenja, vrijednost temperature razlike je nula, ali ovisno o intenzitetu zagrijavanja postupno raste te se uzorak zagrijava varirajućim nestacionarnim toplinskim tokom. U drugoj fazi procesa zagrijavanja, temperaturna razlika Δt postiže maksimalnu relativnu konstantnu vrijednost za period τ . Konstantna vrijednost temperature razlike Δt između opažene temperature u utorima suprotnih uzoraka može biti primijenjena za precizno određivanje koeficijenta λ . U trećoj fazi procesa zagrijavanja, temperaturna razlika Δt počinje se smanjivati. Ako proces zagrijavanja nije završen, čitav sustav uzoraka počinje se pregrijavati. Temperaturni tok kroz materijal je nestacionaran, a razlika je u temperaturi promjenjiva i oscilira. Rezultati mjerenja temperature razlike Δt nisu dovoljno prikladni i dovoljno točni za precizno računanje koeficijenta λ , analogno prvoj fazi procesa zagrijavanja.

d) Toplinska difuznost a određuje se kao korelacija između jednadžbi (1), (2), (3) i s fizikalnim značenjem brzine promjene temperature tijekom toplinskog vođenja u kvazihomogenom okruženju određuje se na sljedeći način, prema [4, 5]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

Ako su uvjeti oba mjerenja jednaki, može se pretpostaviti da su vrijednosti topline isporučene na referentni uzorak Q_1 i ispitivani uzorak Q_2 jednadžba (2), približno jednake:

$$Q_1 = Q_2 \Rightarrow c_2 = c_1 \cdot \frac{\Delta t_1 \cdot m_1}{\Delta t_2 \cdot m_2} \quad (5)$$

Nepoznati specifični toplinski kapacitet c_2 , jednadžba (5), mjeri se koristeći m_1 , tj. masu referentnog uzorka, Δt_1 , je

temperaturna razlika između stijenki referentnog uzorka, Δt_2 je temperaturna razlika između stijenki ispitivanog uzorka, a c_1 je poznata vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta referentnog uzorka.

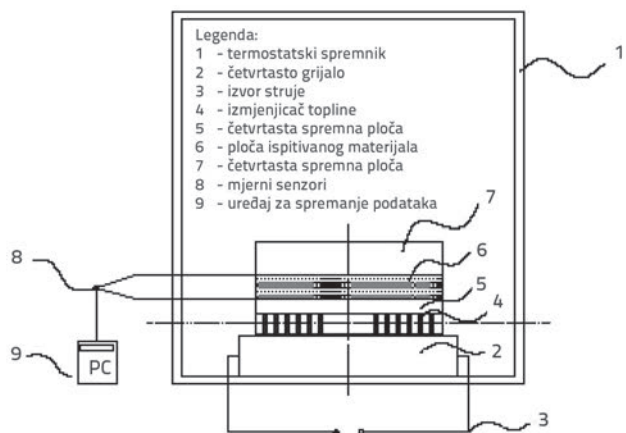
Ako su uvjeti oba mjerenja jednaki, možemo pretpostaviti da su topline isporučene na referentnom uzorku Q_1 i ispitivanom uzorku Q_2 jednadžba (3), približno jednake, što znači da je ulazna snaga P kalorimetrijskog uređaja ista, kao i ukupno vrijeme mjerenja τ , površina S uzorka, učinkovitost η kalorimetrijskog uređaja, a jednaka je i toplina K koju su apsorbirale ostale komponente kalorimetrijskog uređaja.

$$P \cdot \tau \cdot \eta = \lambda_1 \cdot \frac{S}{d_1} \cdot \Delta t_1 \cdot \tau + K \wedge P \cdot \tau \cdot \eta = \lambda_2 \cdot \frac{S}{d_2} \cdot \Delta t_2 \cdot \tau + K \Rightarrow \lambda_2 = \lambda_1 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \quad (6)$$

Nepoznati koeficijent toplinske provodljivosti λ_2 iz izraza (6) mjeri se korištenjem Δt_1 temperaturne razlike između stijenki uzorka od usporednog referentnog uzorka, Δt_2 temperaturne razlike između stijenki uzorka od ispitivanog novog materijala, λ_1 poznate toplinske provodljivosti referentnog uzorka. Vrijednosti d_1 , tj. debljine referentnog uzorka i d_2 , tj. debljine ispitivane žbuke izabrane su tako da budu iste.

2. Laboratorijska ispitivanja

Trideset uzoraka poliuretanske žbuke (novi materijal koji se ispituje) i deset uzoraka od porobetona (P2-500, referentni materijal) izrađeni su kao pločasti uzorci jednakih geometrijskih dimenzija. Svi uzorci su imali istu tlocrtnu dimenziju (10 x 10 cm), dok su debljine bile različite (1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 8 cm i 10 cm). Debljine svakog para uzoraka (ispitivani uzorak i referentni uzorak) bile su uvijek jednake. Izabrane su nedestruktivne metode ispitivanja kako se ne bi promijenila izolacijska i fizikalna svojstva materijala. Najprije je provedeno vaganje uzoraka te mjerenje geometrijskih dimenzija. Ovi su postupci provedeni istodobno s mjerenjem temperaturne razlike između njihovih stijenki. Materijal ispitivanih uzoraka bio je kvazihomogen i porozan pa je zato mjerenje parametara materijala zahtijevalo vrlo precizan pristup. Svaki uzorak (ispitivani ili referentni) izmjeren je u strogo zadanim i usporedivim uvjetima. Temperaturna razlika između stijenki uzoraka izmjerena je pri stacionarnom zagrijavanju u podjednakim vremenskim intervalima, bilo tijekom stacionarnog ili nestacionarnog toplinskog toka. Mjerenja su provedena pomoću uređaja koji su u skladu sa zahtjevima tehnološke prakse (točnost određivanja temperature od 2,5 % i točnost određivanja vremena od 0,2 s). Rezultati mjerenja procijenjeni su na temelju propisane metodologije procjene srednje vrijednosti rezultata mjerenja i njihove nepouzdanosti. Točnost rezultata utvrđena je i s apsolutnom i relativnom nepouzdanosti. Osnovna mjerenja provedena su predloženim mjernim uređajem koji je prikazan na slici 1. i 2. Dodatna su mjerenja provedena i uređajima koji su obično na raspolaganju u inženjerskoj praksi (analitička vaga i pomično mjerilo) [6]. Prikaz ispitnog uzorka vidljiv je na slici 3.



Slika 1. Shema kalorimetrijskog uređaja



Slika 2. Prototip kalorimetrijskoga uređaja.



Slika 3. Prikaz ispitnog uzorka u uređaju (1-metalna ploča za izvor toline, 2-tanka plastična ploča, 3-mjerni uređaj termometra, 4-ispitni uzorak poliuretana, 5-kontrolna mjerna ura, 6-tanka plastična ploča, 7-debela plastična ploča, 8-tanka metalna ploča, 9-debela kamena ploča za opterećenje)

Tablica 1. Prikaz dijela mjernih vrijednosti kako bi se odredio koeficijent toplinske provodljivosti poliuretana

Broj mjerenja	Δt_1 [°C]	Δt_2 [°C]	λ_1 [W/mK]	λ_2 [W/mK]	$\Delta \lambda_2$ [W/mK]	$(\Delta \lambda_2)^2$ [W ² /m ² K ²]	u_{λ} [W/mK]
18	71,8	71,5	0,12	0,120503	-0,00061283	$3,75556 \cdot 10^{-7}$	
19	71,9	72	0,12	0,119833	5,73366E-05	$3,28749 \cdot 10^{-9}$	
20	71,8	72,2	0,12	0,119335	0,00055549	$3,08569 \cdot 10^{-7}$	
				0,119891		$6,87413 \cdot 10^{-7}$	0,000779

2.1. Kalorimetrijski uređaj (kalorimetar)

Na slici 1. prikazan je kalorimetrijski uređaj koji se sastoji od komore s konstantnom temperaturom koja se koristi za izvedbu ispitivanja. Četvrtasto grijalo je elektrootporni grijač i sastavni je dio termostatskog spremnika. Grijača ploča je opremljena izmjenjivačem topline s četiri rebrasta radijatora čija su rebra okrenuta prema gore. U blizini grijala nalazi se četvrtasta spremna ploča izrađena od izolatora. Ispitni uzorak postavlja se na donju kontaktnu ploču. Dimenzije ispitnog uzorka jednake su dimenzijama gornjih i donjih kontaktnih ploča te ploče grijala.

Kako je sa slike vidljivo, s gornje strane ispitnog uzorka nalazi se također četvrtasta spremna ploča. Senzori za mjerenje temperature postavljeni su ispod i iznad ispitnog uzorka (na kontaktu s gornjom i donjom spremnom pločom). Senzor je spojen na uređaj za pohranjivanje podataka koji kasnije služi i za analizu izmjerenih vrijednosti [7]. Razlike između provodljivih i neprovodljivih ploča utvrđuju se empirijski kako bi se regulirala brzina toplinskog toka kroz sustav. Cilj je spriječiti da se mjerenje odvija presporo ili prebrzo s obzirom na toplinsku inerciju ispitivanih materijala. Rezultat mjerenja pri nestacionarnom toplinskom toku (u trećoj fazi toplinskoga toka) je sljedeći: $\lambda = (0,110 \pm 0,003) \text{ W/mK}$. Relativno odstupanje rezultata je 2,7 %. Rezultat mjerenja toplinske provodljivosti λ na ispitivanom uzorku građevnog materijala (poliuretana) pri stacionarnom toplinskom toku za srednju temperaturu materijala je: $\lambda = (0,1199 \pm 0,0008) \text{ W/mK}$. Relativno odstupanje mjernoga rezultata je 0,67 % (tablica 1.).

Koeficijent λ općenito ovisi o temperaturi i vlažnosti. Pri upotrebi ove metode posebno je važno da su mjerni uzorci dobro osušeni te da su vrijednosti vlažnosti međusobno usporedive jer se s

povećavanjem vlažnosti izolacijske sposobnosti ispitivanog konstrukcijskog materijala smanjuju. Na primjer, uzorci poroznog betona koji se uspoređuju, klase YTONG P2-500 i YTONG P4-500, imaju vrijednost koeficijenta $\lambda = 0,12 \text{ W/mK}$ u suhom stanju, dok bi za vlažnost od 4,5 % vrijednost koeficijenta λ bila 0,135 W/mK (prema normi ČSN EN 1745). Navedeni materijal koristi se u građevinskoj industriji, osobito za unutarnje nosive zidove i pregradne zidove.

2.2. Rezultati mjerenja i diskusija

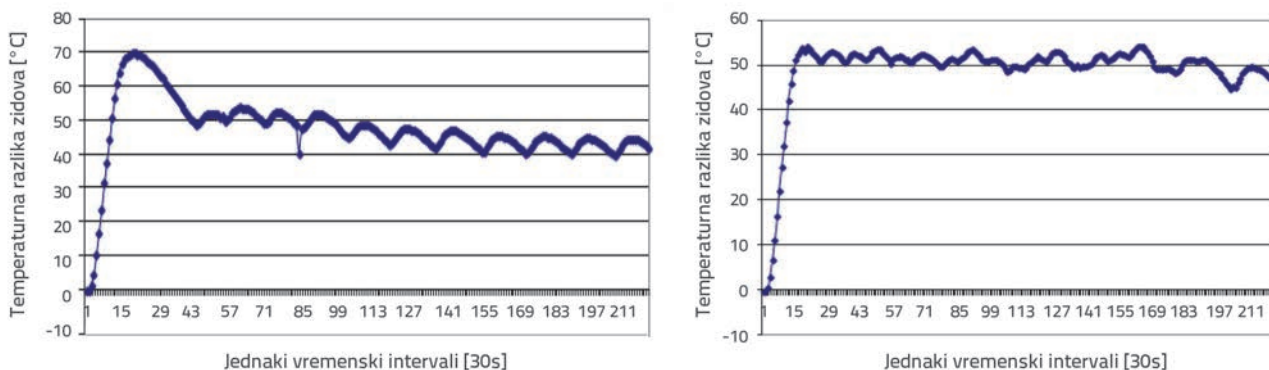
Rad prikazuje novu metodu mjerenja fizikalnih svojstava novog građevnog materijala izrađenog od poliuretana. Mjerenja su obavljena na novokonstruiranom kalorimetrijskom uređaju. Metoda je poslužila za određivanje koeficijenata materijala za toplinsku izolaciju – poliuretanske žbuke (tablica 2.). Podaci za uzorke od porobetona, koje su korištene kao referentni uzorak, preuzeti su iz literature.

Provedeno je mjerenje toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta koji su određeni kako slijedi: $\lambda = (0,110 \pm 0,003) \text{ W/mK}$ s točnošću od 2,7 % i $c = (809 \pm 20) \text{ J/kgK}$ s točnošću od 2,5 % [8, 9]. Osim određivanja mase i mjerenja geometrijskih dimenzija, analizirana su 226 rezultata mjerenja (kod referentnog uzorka) i 223 rezultata mjerenja (kod poliuretanskog novog materijala) temperaturnih razlika između stijenki uzoraka (slike 4. i 5.).

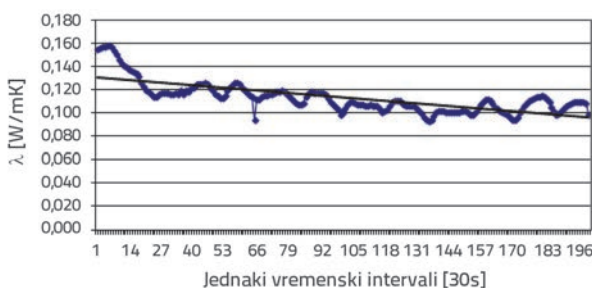
Uspoređeni su rezultati mjerenja provedeni na uzorcima izrađenih od referentnog materijala od porobetona te na uzorcima izrađenih od poliuretanskog materijala za vrijeme stabilnog i nestabilnog toplinskog toka (tablica 2.). Kao što je poznato, svojstva materijala mogu se mjeriti pri stacionarnom

Tablica 2. Srednje vrijednosti svojstava materijala referentnog i ispitnog uzorka dobivenih pomoću novokonstruiranog kalorimetrijskog uređaja te primjenom uređaja ISOMET 2114

Vrsta materijala Svojstva materijala	Ploče od porobetona "referentni uzorak"	Poliuretanska žbuka (novi uređaj)	Poliuretanska žbuka (ISOMET 2114)
Toplinska provodljivost, λ	0,12 [W/mK]	0,11 [W/mK]	0,12 [W/mK]
Gustoća, ρ	500 [kg/m ³]	571 [kg/m ³]	-
Specifični toplinski kapacitet, c	1000 [J/kgK] -	809 [J/kgK] 461 939 [J/m ³ K]	809 [J/kgK] 477 550 [J/m ³ K]
Toplinska difuzivnost, a	$2,4 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$	$2,38 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$	$2,39 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$



Slika 4. Prikaz ovisnosti temperaturne razlike Δt : a) o vremenu u poliuretanskom uzorku debljine 8 cm; b) o vremenu u ytong uzorku debljine 8 cm



Slika 5. Toplinska provodljivost λ poliuretanskog uzorka debljine 8 cm

toplinskom toku ako se temperaturna razlika između dva mjesta održava stalnom, bez obzira na toplinski kapacitet materijala. Na početku grijanja donje površine ispitnog uzorka, temperaturna razlika između gornje i donje površine uzorka je nula. Tijekom zagrijavanja temperaturna razlika postupno raste što dovodi do nestacionarnog toplinskog toka ispitnog uzorka. Čim toplinski tok postane stacionaran, potrebno je relativno kratko vrijeme da temperature na dvije strane uzorka postanu konstantne. Ovisno o vrsti zagrijavanja, materijalu i geometrijskim dimenzijama uzorka, vremensko razdoblje može biti relativno kratko. Tijekom duljeg razdoblja stacionarnog toplinskog toka moguće je fitanje rezultata mjerenja s pravcem koji je paralelan s osi vremena, u više točaka. Međutim, ako se grijanje nastavi, cijeli uzorak poprimi jednaku temperaturu te uzorak tada prenosi svu primljenu toplinu na druge ploče u sustavu i konačno postaje grijačom pločom. Temperaturna razlika između stijenki uzorka se smanjuje, a njegov se toplinski tok vraća u nestacionarni. Ispitni uzorak ne smije biti od istog materijala nego od nekog usporedivog tako da se lokalni ekstremi oba toka barem djelomično preklapaju. U razmacima sjecišta tijekom grijanja u vremenu, iz izmjerenih rezultata mogu se odrediti koeficijenti materijala izračunom pomoću izraza (5), (6) ili grafički (slika 3.) kao srednja vrijednost.

Za usporedbu rezultata mjerenja izabrano je mjerenje uređajem ISOMET 2114. To je pouzdani prijenosni ručni uređaj za izravno mjerenje toplinske provodljivosti, specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta, toplinske difuznosti i temperature (ne samo kompaktnih nego i materijala u rastresitom stanju i tekućina) pomoću zamjenjive igle i/ili ravnih sondi. Svaka

sonda ima ugrađenu memoriju u koju su pohranjene njene konstante za umjeravanje. To je univerzalni uređaj kojim upravlja mikroprocesor. Načelo mjerenja sastoji se od uporabe nestacionarne kontaktne metode, tj. analize vremenske ovisnosti temperaturne reakcije ispitivanog materijala na toplinske impulse (toplinski se tok ostvaruje električnim zagrijavanjem grijača u sondi koja je u izravnom dodiru s ispitivanim uzorkom). Krivulja temperature, kao funkcija vremena, uzorkuje se u zasebnim točkama te se kasnije provodi regresijska analiza primjenom metode najmanjih kvadrata. Koeficijenti regresijske analize služe za izračun termofizikalnih parametara. Postupak mjerenja je relativno jednostavan: najprije se mjere masa i geometrijske dimenzije uzorka, a zatim se uzorak namješta u uređaju. Namještanje uzorka povezano je s potrebom ostvarivanja dobrog prijenosa topline sa sonde na uzorak, a sastoji se od činjenice da treba oblikovati ravnu (glatku) površinu promjera 0,025 cm. Nakon toga se na takvu površinu može dobro postaviti mjerna sonda koja je spojena na sam uređaj. Tek tada se može obaviti postupak mjerenja koji traje nekoliko minuta, a čiji će se rezultati prikazati na zaslonu na kraju mjerenja. Rezolucija izravnih mjerenja fizikalnih veličina zadovoljava kad se radi o uređaju ISOMET 2114. Za mjerenje toplinske provodljivosti to je vrijednost od $0,001 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, za mjerenje specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta je $103 \text{ J}/\text{m}^3\text{K}$, za mjerenje toplinske difuznosti je $109 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, a za mjerenje temperature je $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$.

Relativna mjerna odstupanja za toplinsku provodljivost su $\pm 10 \%$ od srednje vrijednosti rezultata mjerenja ($+ 0,005 \text{ W}/\text{mK}$), dok su za mjerenje specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta je $\pm 15 \%$ od srednje vrijednosti rezultata mjerenja ($+ 3\cdot 10^3 \text{ J}/\text{m}^3\text{K}$). Raspon mjerenja temperature uređaja je od $0 \text{ }^\circ\text{C}$ do $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Za toplinsku provodljivost područje mjerenja je od $0,015 \text{ W}/\text{mK}$ do $6 \text{ W}/\text{mK}$, za specifični volumenski toplinski kapacitet je od $4\cdot 10^4$ do $4\cdot 10^6 \text{ J}/\text{m}^3\text{K}$, a za temperature uzorka je od $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+70 \text{ }^\circ\text{C}$. U tijeku mjerenja obavljenog novokonstruiranim uređajem, vrednovana su statistička apsolutna i relativna odstupanja (nepouzdanosti) rezultata mjerenja. Zbog toga je postignuta dobra usporedivost rezultata mjerenja dobivenih pomoću dva različita uređaja, izrađena je baza podataka za rezultate u usporedivim uvjetima (ispitnih uzoraka od poliuretana na istoj

temperaturi i istoj vlažnosti). Toplinska provodljivost žbuke od poliuretanskog materijala na deset različitih mjesta na zadanom uzorku (geometrijske dimenzije 15 x 15 x 8 cm) izmjerena je komercijalnim uređajem ISOMET 2114 (tablica 1.). Rezultati mjerenja prikazani u tablici 1. mogu se općenito pisati prema izrazu (7):

$$\lambda = \bar{\lambda} \cdot u_{\lambda} \text{ [W/mK]} \quad (7)$$

gdje λ predstavlja vrijednost toplinske provodljivosti, $\bar{\lambda}$ je srednja vrijednost rezultata mjerenja, a u_{λ} je apsolutno odstupanje rezultata mjerenja [8]. Sukladno tome, rezultat provedenog mjerenja može se napisati, prema (7), u sljedećem obliku: $\lambda = 0,123 \pm 0,002 \text{ [W/mK]}$. Koeficijent varijacije rezultata mjerenja toplinske provodljivosti može se općenito pisati u sljedećem obliku pomoću izraza (8):

$$\rho_{\lambda} = \frac{u_{\lambda}}{\bar{\lambda}} \cdot 100 \% \quad (8)$$

Sukladno tome, koeficijent varijacije rezultata mjerenja toplinske provodljivosti, dobiven izrazom (8), iznosi $\rho_{\lambda} = 1,6 \%$ i može se ocijeniti kao dovoljno točan rezultat u okviru laboratorijskih mjerenja.

Mjerenje koeficijenta specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta novog poliuretanskog materijala na deset različitih mjesta u zadanom uzorku (s geometrijskim dimenzijama 15 x 15 x 8 cm) obavljeno je pomoću komercijalnog uređaja ISOMET 2114, a rezultati su prikazani u tablici 1. Rezultati mjerenja prikazani u tablici 1. mogu se općenito pisati prema izrazu (9):

$$c_v = \bar{c}_v \pm u_{c_v} \text{ [J/m}^3\text{K]} \quad (9)$$

gdje c_v predstavlja koeficijent specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta, \bar{c}_v je srednja vrijednost rezultata mjerenja, a u_{c_v} je apsolutna nepouzdanost rezultata mjerenja, [8]. Sukladno tome, rezultat provedenog mjerenja može se, prema (9), pisati u sljedećem obliku: $c_v = 477\,550 \pm 5165 \text{ [J/m}^3\text{K]}$.

Koeficijent varijacije rezultata mjerenja specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta može se, prema izrazu (10), pisati u sljedećem obliku:

$$\rho_{c_v} = \frac{u_{c_v}}{\bar{c}_v} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Sukladno izrazu (10), relativno odstupanje rezultata mjerenja specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta iznosi $\rho_{c_v} = 1,1 \%$ i može se ocijeniti kao dovoljno točan rezultat u okviru laboratorijskih mjerenja.

U svrhu usporedbe obavljeno je i mjerenje gustoće materijala, jer je ISOMET 2114 vrednovao samo specifični volumenski toplinski kapacitet, a ne i masu. Neizravnim mjerenjem gustoće materijala (preciznim određivanjem mase poliuretanskih uzoraka i mjerenjem geometrijskih dimenzija), utvrđena je srednja gustoća svih poliuretanskih uzoraka od $\rho = 571,4 \pm$

7,4 kg/m³, pri normalnoj temperaturi prostora (24 °C) i na istoj vlažnosti (uzorci materijala bili su nehomogeni, vrlo porozni pa je zato njihova gustoća bila relativno vrlo mala). Mjerenje srednje gustoće materijala obavljeno je s točnošću relativnog odstupanja rezultata mjerenja od 1,3 % pa se, u okviru zahtjeva za točnošću laboratorijskih mjerenja, može ocijeniti kao točno.

U vezi s navedenim rezultatima može se ustanoviti da novi materijal sa srednjom vrijednosti koeficijenta specifičnog toplinskog kapaciteta od 809 J/kgK i sa srednjom vrijednošću gustoće od 571 kg/m³ ima specifični volumenski toplinski kapacitet od 461939 J/m³K, što se dobro poklapa sa srednjom vrijednošću specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta izmjenjenog izravno komercijalnim uređajem ISOMET 2114, odnosno, 477 550 J/m³K.

Mjerenje toplinske difuznosti novog poliuretana na deset različitih mjesta na zadanom uzorku dimenzije 15 x 15 x 8 cm također je obavljeno komercijalnim uređajem ISOMET 2114, a rezultati mjerenja su prikazani u tablici 2. Rezultati mjerenja prikazani u tablici 2. mogu se općenito pisati prema izrazu (11):

$$a = (\bar{a} \pm u_a) \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (11)$$

gdje a predstavlja toplinsku difuznost, \bar{a} je srednja vrijednost rezultata mjerenja, a u_a je apsolutna nepouzdanost rezultata mjerenja [8]. Sukladno izrazu (11), vrijednost koeficijenta toplinske difuznosti je: $a = (2,39 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}$. Relativno odstupanje rezultata mjerenja koeficijenta toplinske difuznosti dobiva se pomoću izraza (12):

$$\rho_a = \frac{u_a}{\bar{a}} \cdot 100 \% \quad (12)$$

Sukladno izrazu (12), relativna nepouzdanost rezultata mjerenja koeficijenta specifičnog volumenskog toplinskog kapaciteta iznosi $\rho_a = 2,5 \%$ i može se ocijeniti kao dovoljno točan rezultat u okviru laboratorijskih mjerenja.

Kao što je prethodno navedeno, mjerenja su provedena na uzorcima različitih debljina, pri čemu su uspoređivani rezultati mjerenja dobiveni na ispitivanju poznatog materijala s rezultatima dobivenih pri ispitivanju novog materijala. Međutim, zahtjev za točnim cjelokupnim rezultatom mjerenja bio je da uspoređeni uzorci budu iste debljine, a istodobno su debljine bile relativno zanemarive u odnosu na druge geometrijske dimenzije. Najtočniji rezultati zabilježeni su za uzorke geometrijskih dimenzija 15 x 15 x 8 cm, najviše odstupanja zabilježeno je kod uzoraka debljine od 6 i 8 cm, dok su rezultati ocjene toplinskih svojstava za uzorke debljine 10 cm imali najviše odstupanja i bili su neupotrebljivi. Osnova rezultata mjerenja opisanih u ovome radu odnosi se na rezultate ispitivanja uzoraka dimenzije 15 x 15 x 8 cm.

Odstupanja rezultata mjerenja statistički su obrađena, za tip A koristi se najprije odstupanje, a zatim relativno odstupanje rezultata mjerenja. Odstupanje rezultata za tip B, mjereno pomoću termometra, također je uzeto u obzir kako bi se

izmjerila razlika u temperaturi. Složenost odstupanja tipa C, a zbog toga i relativno odstupanje rezultata cjelokupnog mjerenja, određeni su kao srednja vrijednost odstupanja tipova A i B. Za ispitivanje ploča navedene debljine (1 cm do 8 cm), relativno odstupanje rezultata mjerenja iznosi 0,5 % do 3 %. Uzdužne i poprečne dimenzije ploče ne smiju biti istog reda veličina jer se veliki dio primijenjene topline ispušta kroz bočne rubove uzorka, pa je za primijenjenu ploču kvadratnih dimenzija 15 cm x 15 cm preporučeno uzeti debljinu od 1,5 cm, ali ne i 15 cm.

Isto tako, rezultati mjerenja se dobro slažu s tabličnim vrijednostima za poliuretanski materijal sličnog sastava. Međutim, ispitivani novi materijal (poliuretanska žbuka) potvrdio je i nova građevna svojstva kao žbuka za obnovu zgrada, koji nema samo vrlo visok učinak toplinske izolacije. Kao vezivni materijal korišten je portland cement CEM I 42.5R. Ta nova žbuka djeluje također i kao zaštita od vlage. Dodatni je praktični doprinos ovog materijala u tome što ne uzrokuje degradaciju zida i, istodobno, ponovno zaslanjivanje zida zbog promjene djelomičnog tlaka i/ili zbog toga što ne nastaje gradijent vlažnosti.

Na temelju svih izvedenih mjerenja izabrana je optimalna mješavina za novi poliuretanski materijal prema obvezujućim zahtjevima za dopunskim mjerama kod složenijih tehnoloških zahvata pri sanacijama i obnovama, kao što su npr. hidroizolacija, injektiranje, elektroosmotske metode itd. U slučaju ove vrste žbuke za obnovu, poliuretanska pjena ugrađena u masu cement-metakaolin omogućuje zbog svoje poroznosti, tj. veličine i strukture pora, i ekvivalentnog (efektivnog) modula elastičnosti nekoliko puta povećanje kapaciteta za taloženje soli u strukturi žbuke za obnovu s toplinskim izolacijskim djelovanjem ne razarajući tu inovativnu mješavinu. Takav fizikalni učinak moguć je zbog utjecaja povećanja volumena kristala soli i tlakova kristalizacije i ponovne kristalizacije u strukturu s time povezane određene mješavine. Zbog ovih promjena u materijalu predviđene su promjene vrijednosti termofizikalnih svojstava (gustoća, toplinska provodljivost i toplinska difuznost te specifični toplinski kapacitet). U svrhu tabličnog prikaza za praktičnu uporabu usporedivim metodama mjerenja točno su izmjerena toplinska svojstva novog materijala, [1]. Optimalna formula iz navoda odnosi se na literaturu u [1]. Ovo je temeljna formula nastanka PUR pjene.

Iako novi materijali imaju tražena toplinska svojstva i uvelike se koriste u građevinskoj industriji, međutim, potrebno je provesti i dodatna mjerenja kako bi se moglo potvrditi predviđanja njihove amortizacije. Nadalje, treba uzeti u obzir osnovne standardne parametre izolacijskih materijala. Vijek trajanja ispitivanih materijala može biti 30 do 80 godina, ovisno ne samo o strukturi materijala nego i o uključivanju materijala u sastav žbuke te o načinu primjene. Zbog toga se toplinska svojstva novih materijala moraju točno izmjeriti ne samo na početku. Potrebno je i kasnije raditi i ponavljati mjerenja u dugoročnom razdoblju u jednakim vremenskim razmacima i u jasno utvrđenim uvjetima. Tek nakon provjere mnogih aplikacija tijekom desetljeća moguće je donijeti jasne zaključke o prototipu materijala za čiju je točnu

specifikaciju razvijen novi uređaj i s njime povezana nova metoda [1]. Kako bi se ispitala toplinska svojstva poliuretanske žbuke, pripremljene su različite eksperimentalne smjese u kojima je udio PUR komponente u rasponu od 15 do 30 % mase smjese. Na spomenutom uređaju provedeno je 290 ispitivanja na različitim materijalima, dok je 165 ispitivanja provedeno na različitim eksperimentalnim serijama različitoga sastava baziranim na PUR žbuki. Sastav nekih od njih dan je u radovima [1, 2].

Ako su ispunjeni zahtijevani uvjeti mjerne metode, pomoću te metode mogu se ispitivati različiti materijali; mjerenje iz ovoga primjera odnosi se konkretno na mjerenje svojstava materijala za građenje s obzirom na zahtjeve projekta.

Nisu primijenjeni poliuretanski uzorci koji podliježu propadanju od UV zračenja. Primijenjena je PUR izolacijska žbuka kod koje su ukomponirana zrna poliuretanske pjene u cement nakon isteka njezina roka trajanja. Očekuje se da će se na poliuretansku žbuku primijeniti gotova silikonska žbuka koja je otporna na UV zračenje, stoga zaštićuje PUR žbuku. Portland cement CEM I 42.5 R upotrebljava se kao vezivno sredstvo prema odredbama EN 107-1. Udio komponenti istraživane poliuretanske žbuke je slijedeći: poliuretan 15-30 %, cement CEM I 42.5 R 40-65 %, voda 40-70 %, aditivi 0,5 - 1,5 % te metakaolin 12-35 %. Navedeni podatak temelji se na eksperimentalnom i primijenjenom istraživanju te na znanju iz prakse. Oko 90 obiteljskih kuća u moravsko-šleskom kraju u Republici Češkoj toplinski je izolirano termalnom izolacijom primjenom poliuretanske žbuke. Rezultati eksperimentalnog istraživanja objavljeni su u [11].

3. Zaključak

Predstavljeni rezultati mjerenja koeficijenta materijala poliuretanske žbuke dobiveni su novorazvijenom metodom i ispitivanjem na novokonstruiranom uređaju. Ti su rezultati također potvrđeni mjerenjem na komercijalnom uređaju ISOMET 2104 i daju pouzdane podatke o toplinskoj provodljivosti u stacionarnom stanju za novu vrstu toplinskoizolacijske žbuke koja je analizirana u dobrom izolacijskom i kvazihomogenom okruženju. U usporedbi s klasičnim uređajima, glavna je prednost nove metode ispitivanja i novog uređaja u tome što hlađenje i grijanje ne treba više držati na stalnoj vrijednosti temperature. U početku je kroz promatrani uzorak toplinski tok bio nestacionaran, ali nakon nekog vremena toplinski tok prelazi u stacionarni. Osmišljeno rješenje ispitivanja primjenjuje se i na ispitivanje specifičnog toplinskog kapaciteta pod uvjetom da je utvrđena masa ispitivanog uzorka. Nakon što se ocijene gustoća uzorka, rezultati mjerenja specifičnog toplinskog kapaciteta, toplinske provodljivosti i volumenske mase, možemo te rezultate koristiti u izračunu koeficijenta toplinske difuzivnosti. Međutim, navedene prednosti zahtijevaju da se uzme u obzir uvjet usporednog ispitivanja referentnog uzorka. Usporedba uključuje jednake postupke ispitivanja na jednakom uređaju, i to za referentni uzorak i ispitni uzorak materijala. Međutim, mjerenje referentnog (etalonskog) uzorka je jednokratno i

pohranjuje se u programu procesora za proračunske tablice. Druge prednosti uređaja su i njegovi niski troškovi proizvodnje, jednostavno operativno održavanje, lak i brz postupak ispitivanja, zadovoljavajuća točnost rezultata (relativno malo odstupanje) i dugotrajnost jer ne sadrži pokretne dijelove.

Suvremeni komercijalni uređaji bazirani na nestacionarnim kontaktnim metodama mjere toplinska svojstva materijala samo na njegovoj površini. Ove metode se temelje na pretpostavci da je materijal savršeno homogen.

Doprinos i originalnost novog uređaja sastoji se u činjenici da se toplinski koeficijenti materijala mjere u cijelom volumenu ispitivanog uzorka. Nova je metoda mjerenja [10] kontaktna, usporediva, nestacionarna - uz određivanje toplinskog

stacionarnog intervala mjerenja, a može se primijeniti koristeći prijenosni uređaj jednostavan za rukovanje. Također se može primijeniti na relativno jednostavan način bez potrebe ugradnje u termostat, te je stoga relativno lakše primjenjiva nego što su stacionarne metode uređaja s pločom.

Zahvale

Ovaj rad podržao je projekt RMTVC (br. CZ.1.05/2.1.00/01.0040), projekt IT4 Inovacijskog centra izvrsnosti (broj: CZ.1.05/1.1.00/02.0070), projekt Instituta čistih tehnologija za rudarstvo i korištenje sirovina za primjenu u energetici (broj: CZ.1.05/2.1.00/03.0082) i SGS projekt SP2014/114.

LITERATURA

- [1] Vaclavik, V., Dvorsky, T., Dirner, V., Daxner, J., Stastny, M.: Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete. *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*. Volume 19, Issue 3, pp. 665-672, 2012.
- [2] Vaclavik, V., Valicek, J., Dvorsky, T., Hryniewicz, T., Rokosz, M., Harnicarova, M., Kusnerova, M., Daxner, J., Bendova, M.: A method of utilization of polyurethane after the end of its life cycle. *Rocznik Ochrony Środowiska*. Volume 14, pp. 96-106, 2012.
- [3] Tsukinovsky, D.: *Study of thermodynamic properties of polyurethane under weak impact conditions*. Ben-Gurion University of the Negev, 1997.
- [4] Ziman, J. M.: *Principles of the theory of solids*. Cambridge, Univ. Press, 1972.
- [5] Baily, M.: *Survey of thermodynamics*. American Institute of Physics, New York, 1994.
- [6] VSB-TU OSTRAVA. *The device for identifying the physical properties of solid materials*. Inventors: Kusnerova, M., Valicek, J., Vaclavik, V., Daxner, J., Praha: Industrial Property Office ČR: UV 23861, U1, G01N 25/18 (2006.01), G01N 27/18 (2006.01), Owner: VSB-TUO, Ostrava, CZ a D&DAXNER Technology, s.r.o, Ostrava, CZ, 2012.
- [7] Kostial, P., Ruziak, I., Jonsta, Z., et al.: Experimental method for complex thermo-mechanical material analysis. *International Journal of Thermophysics*. Volume: 31, Issue: 3, pp. 630-636, 2010. DOI: 10.1007/s10765-010-0745-5.
- [8] Kusnerova, M., Valicek, J., Harnicarova, M., et al.: A proposal for Simplifying the Method of Evaluation of Uncertainties in Measurement Results. *Measurement Science Review*. Volume: 13, Issue: 1, pp. 1-6, 2013. DOI: 10.2478/msr-2013-0007.
- [9] Bezjak, M.: Measurement uncertainty associated with the thermal conductivity of building materials, GRADEVINAR 56 (2004) 5, pp. 289-293 (in Croatian)
- [10] VSB-TU Ostrava. Equipment for the identification of physical properties of solid materials. Inventors: Kusnerova, M., Valicek, J., Vaclavik, V., Daxner, J. *Utility model CZ 23861 U1*. 24. 05. 2012, Czech Republic, 2012.