SAT-9.2-1-HT-07

# Analysis of the structure and heat conducting properties of the insulating coating AKTERM

Penka Zlateva, Rositsa Petkova-Slipets, Aleksi Lyutskanov

# Анализ на структурата и топлопроводящите свойства на топлоизолационно покритие АКТЕРМ

Пенка Златева, Росица Петкова-Слипец, Алекси Люцканов

**Analysis of the structure and heat conductivity properties of the insulating coating AKTERM:** Heat insulating coating AKTERM belongs to the new energy efficient materials with energy-saving and anti-corrosion effect. It is a syntactic foam - acrylic water-based solution with insulating agent – cenospheres (aluminium-silicate vacuum microcapsules). The heat insulating coating AKTERM has low heat penetrability due to its low thermal conductivity, low density and low specific heat capacity.

The aim of research is to study the thin coating structure and main heat conductivity properties by using the modified transient plane source method (MTPS method). The thermal conductivity coefficient, specific heat capacity, thermal effusivity and thermal diffusivity were determinate.

The results showed that ceramic hollow spheres distribution is relatively equal on the surface and in depth. Thermal effusivity is low and is comparatively with those of polymer foams. Thermal diffusivity is with low values as well. It means that the thin AKTERM coating meets the main requirements for external insulation.

**Key words:** Syntactic foam, Structural analisys, AKTERM, MTPS method, Thermal effusivity, Thermal diffusivity, Thermal conductivity coefficient, Specific heat capacity.

## ВЪВЕДЕНИЕ

Ключов момент при проектирането, реализирането и експлоатацията на сградите и съоръженията днес се явява тяхната енергийна ефективност и най-вече частта от съхранение на топлината. На пазара на топлоизолационните материали се предлагат широк спектър от материали с разнообразни характеристики по отношение на коефициент на топлопроводност, якост и топлоустойчивост.

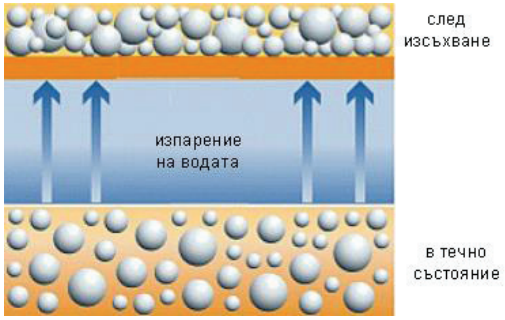
Най-новото и перспективно поколение топлосъхраняващи материали са т. нар. синтактни пени – газонапълнени композитни полимерни материали, използващи различни органични свързващи вещества и микросфери като пълнител, равномерно разпределен в матрицата. С индустриално значение на този етап са еднокомпонентните свързващи вещества – най-често воден разтвор на акрилна основа, но са сполучливи и двукомпонентните на основата на епоксидна смола. Закритата пористост при тези пени се формира не в резултат на използването на газообразуващи добавки, а благодарение на въвеждането на 60-80% кухи сферични частици [3, 8].

Микросферите могат да бъдат плътни и кухи от стъкло, керамика или полимер. [3, 9] Най-ефективни, от гледна точка постигане на оптимален компекс от физико-механични показатели се явяват керамичните кухи микросфери, т. нар, ценосфери. Алумосиликатните микробалончета се получават при факелното изгаряне на каменни въглища и притежават почти идеална сферична форма. [4] Те притежават обещаващ потенциал, поради ниската си плътност и голямата специфична повърхност. Диаметърът на сферите обикновено е в интервала 20 – 150 μm, а дебелината на стената - около 10 % от диаметъра [10].

Синтактните пени съчетават ниска топлопроводност, ниска плътност и добра обработваемост – благодарение на микросферите, и механична якост и топлоустойчивост - осигурявани от свързващото вещество. Това ги прави удачен

материал за употреба като топлоизолационно покритие както в жилищното, така и в промишленото строителство [1, 4], а също и като звукоизолационен материал [9].

Съществено преимущество на синтактните пени е, че първоначално те са в течно състояние (фиг. 1). Това позволява създаването на тънки покрития по повърхността на топлоизолируемия материал или конструкция. Крайната структура се формира след изпаряване на водата от разтвора на матрицата.




***Фиг.1. Схематично представяне на формирането на ТТП***

Тънките топлоизолационни покрития (ТТП) повишават чувствително контактната температура на повърхността върху която са нанесени. Този ефект е обяснен с тяхната много малка топлопроницаемост, изразяваща се чрез ниската стойност на коефициента на топлопроницаемост *e* (b, β) [6].

$$e = \left(k.\rho.c\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

където: *k* – коефициент на топлопроводност, W/(m.K); *c* – специфичен топлинен капацитет, J/(kg.K); *ρ* – плътност, kg/m$^3$.

Ниската топлопроницаемост обуславя висока контактна температура за стенните повърхности на помещенията и елементите на обзавеждането (преди всичко вътрешните стенни повърхности на външните стени през зимния период), но освен това е определяща и за антикондензните и енергоспестяващи качества на покритията.

Топлопроницаемостта при термокерамичните покрития зависи от процентното съдържание на керамичните капсули, от техния вид, респективно от техния коефициент на топлопроводност, специфичен топлинен капацитет и плътност. Във връзка с очакваното масово навлизане в практиката на тези и подобни свръхтънки топлоизолационни покрития, очевидна е необходимостта от контрол на декларираните им параметри.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

В настоящата работа е направен структурен анализ и са изследвани специфичния топлинен капацитет, термичната дифузия и коефициентите на топлопроницаемост и топлопроводност на ТТП на основата на синтактна пяна АКТЕРМ.

## МАТЕРИАЛИ, АПАРАТУРА И МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

### *Материали*

Обект на настоящото изследване е топлоизолационно покритие АКТЕРМ, което е течна композиция на водна основа, състояща се от синтетичен каучук, акрилни полимери, диспергирани в тази композиция керамични вакуумни микросфери, а също така оксиди на титан, калций и цинк [16].

Изследваните образци (5 броя) са изготвени като върху подложка – стъклена

плоча с размери 24x24x8 mm, е нанесено равномерно покритие от АКТЕРМ с помощта на пистолет.

Преди и след нанасяне на покритието на координатна машина е измерена дебелината на покритието на образците в 144 точки с цел по-голяма прецизност на изследванията.

Всички образци са с измерена средна дебелина на покритието 230 μm.

Изчислената обемна плътност на покритието от АКТЕРМ е 430 kg/m$^3$.

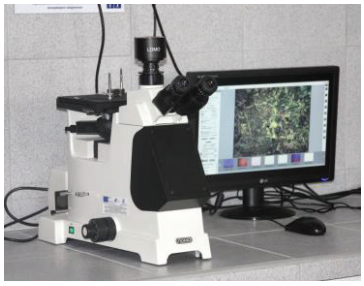
## 2. Използвана апаратура и методи на изследване

### *Структура*

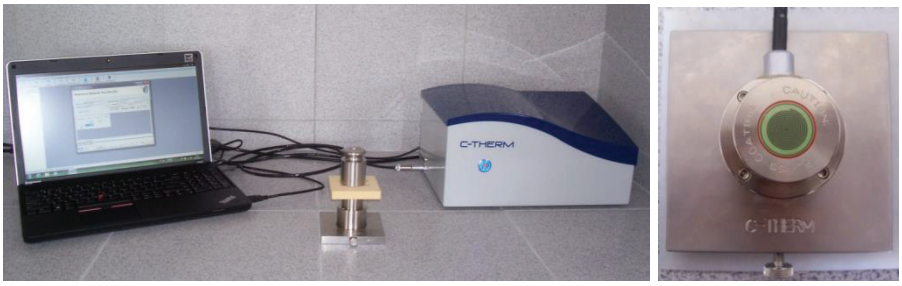
Структурата на образците е изследвана с помощта на светлинен инверторен микроскоп METAM LV-41, заснета е с принадлежащия към микроскопа комплекс за визуализация TC-500 и специализирания софтуер „Микро-Анализ View" (фиг.2). За целите на настоящото изследване се работи при различни оптични увеличения в светло поле при косо осветление. Това позволява неполираната, светлопропусклива и матова (не отразяваща светлината) бяла повърхност да се наблюдава по-добре. Използван е и модула за диференциално-интерференционен контраст към микроскопа, което позволи да се откроят по-добре структурните компоненти.

### *Топлофизични изследвания*

Топлофизичните показатели са определени с анализатор за топлопроводност TCi, производство на CTherm Technologies, Канада (фиг. 3). Измервателният обхват е *k*=0-220 W/mK и *e*=0-23000 Ws$^{1/2}$/m$^2$K при точност: ±5%. Апаратът е последно поколение от вида си и в окомплектовката му влизат сензор, контролер и лаптоп със специализиран софтуер.

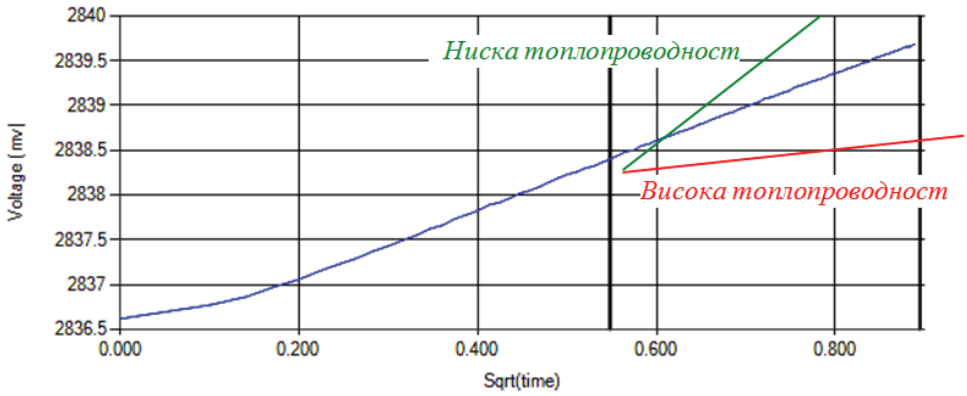


***Фиг.2. Общ вид на микроскоп METAM LV-41***




***Фиг.3. Общ вид на TCi анализатор и TCi сензор***

Процедурата на изпитване се състои от едностранно топлинно въздействие, осъществявано от сензора към изпитвания образец, който се нагрява с около 1-3$^{O}$C. По време на теста част от топлината се абсорбира от изпитвания материал в зависимост от топлопроводността му. Останалото количество топлина предизвиква повишаване на температурата на повърхността на сензора. Колкото по-ниска е топлопроводността на материала, толкова по-висока е скоростта на нарастване на температурата на повърхността на сензора (фиг. 4) [6].




***Фиг.4. Зависимост напрежение-време на сензора за определяне на топлопроводността на изпитваните материали с TCi анализатор [6]***

TCi анализторът измерва коефициента на топлопроницаемост *e* и коефициента на топлопроводност *k*. Топлинният капацитет $c_p$, термичната дифузия α и термичното съпротивление *R* се изчисляват от софтуера по зависимости (2), (3) и (4).

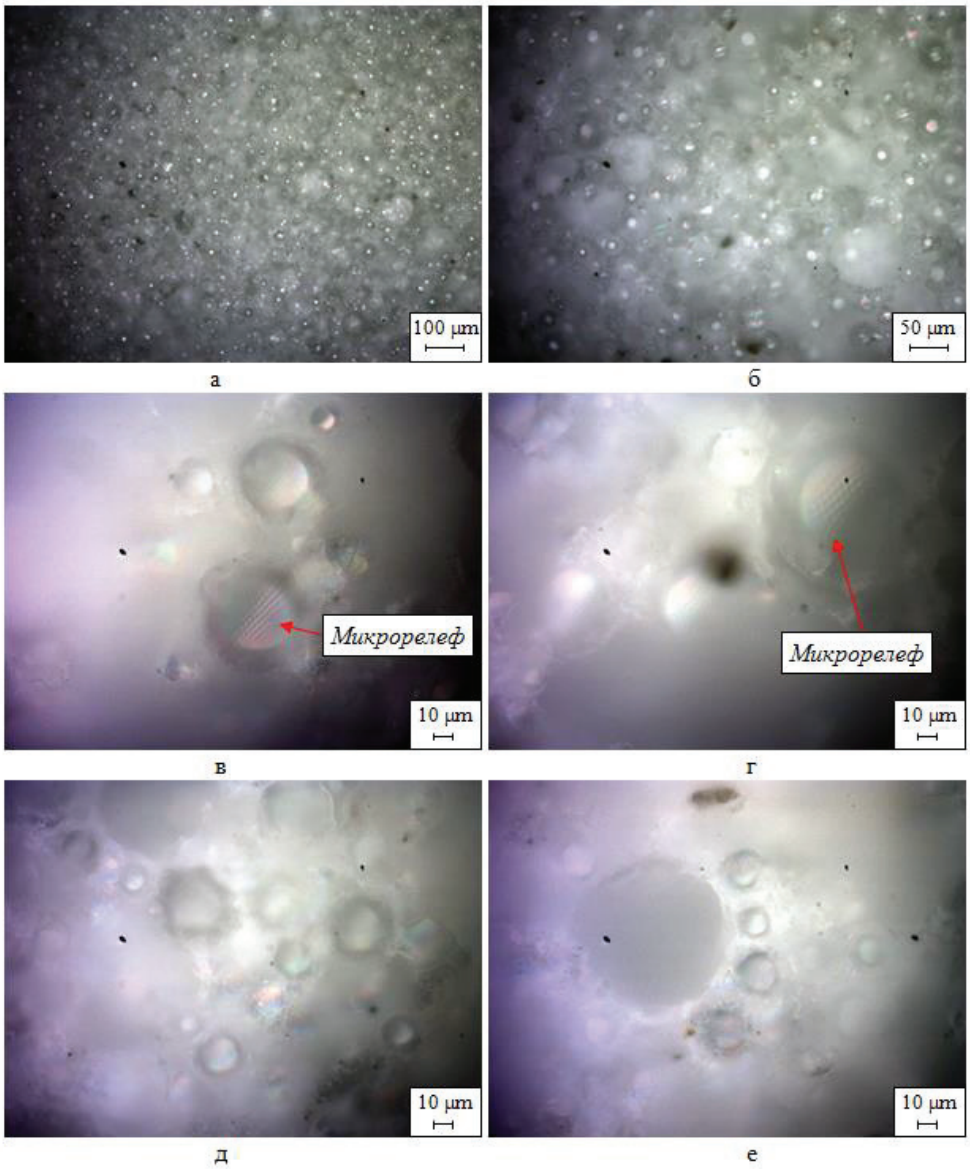
$$c_p = \frac{e^2}{k.\rho} \quad (2) \qquad \alpha = \frac{k}{\rho.c_p} \quad (3) \qquad R = \frac{\sqrt{4.\alpha.t}}{k} \quad (4)$$

Всички изпитвания са проведени като е спазена методиката за работа с TCi анализатора, както и изискванията на БДС ISO 22007-1:2013 [7]. Преди всяко измерване е проведен тест с калибриращ материал LAF 6720B.

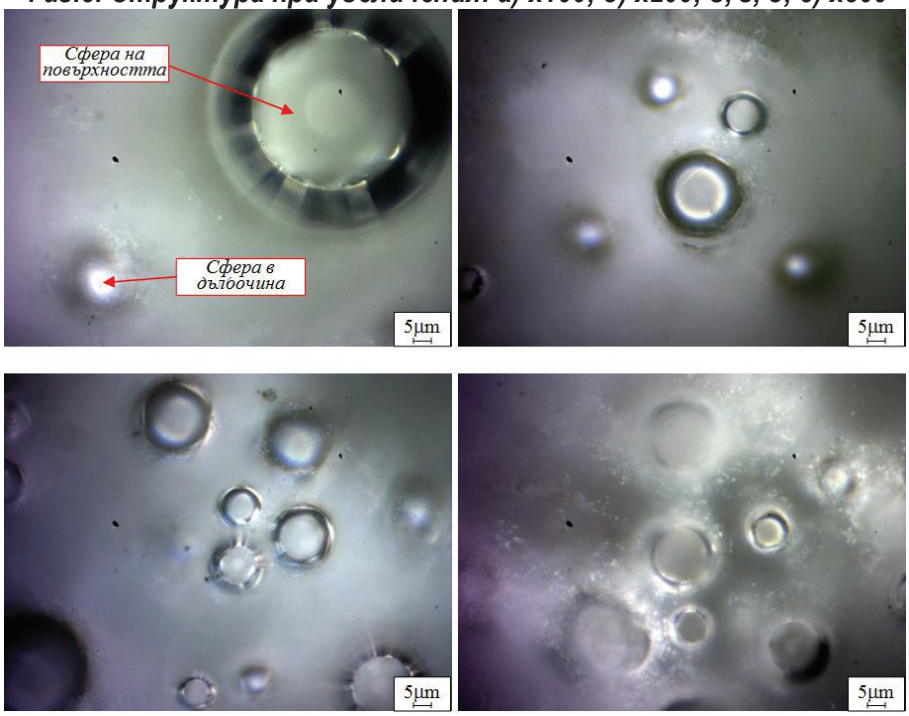
Изпитването е локално в зона с диаметър 17 mm. За интегрирана оценка на топлопроводящите свойства на изследваното тънкослойно покритие АКТЕРМ са провеждани по 10 измервания в 5 различни точки на всеки от петте изработени образци.

### 3. Резултати и анализ

Размерът и разпределението на частиците на пълнителя в значителна степен могат да повлияят на свойствата на полимерните композити. Затова е и изследвана структурата на тънкото покритие. Резултатите са представени на фиг. 5 и фиг. 6.




***Фиг.5. Структура при увеличения: а) x100; б) x200; в, г, д, е) x500***



***Фиг.6. Структура при увеличение x1000***

Структурният анализ показва, че матрицата на покритието е напълнена с частици с правилна сферична форма и разнороден размерен фактор - диаметър от 5 μm до около 50 μm. В зрителното поле са регистрирани, както единични, така и струпвания от частици. Сферите са относително равномерно разпределени по цялата наблюдавана повърхност и заемат около 60-70% от нея.

Разнородните по размер сечения, които се наблюдават на повърхността на покритието са показател, че частиците са не само са с различни диаметри, но и че са разположени относително равномерно в дебелината на слоя.

Установи се, че повърхността на сферите не е гладка, а със специфчен микрорелеф (фиг. 4 в, г), който се проявява само при косо осветление и интерференция.

Резултатите от изпитването на пробите с TCi анализатор по метода на кратковремненния топлинен източник са представени в *табл. 1*. Относителното стандартно отклонение (RSD) за всички измервания е под 1%.

***Таблица 1. Топлофизични показатели за покритие АКТЕРМ от изпитване с TCi анализатора***

| № | e, $Ws^{1/2}/m^2K$ | $k_{екв}$*, W/m.K | $k_a$**, W/m.K | Cp, J/kg.K | α, $m^2/s$ | R, $m^2K/W$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 184,9 | 0,069 (RSD 0.4%) | 0,002985 | 1031.67 | $1.39.10^{-7}$ | 1.77 |
| 2 | 150,7 | 0,058 (RSD 0.7%) | 0,003358 | 817.35 | $1.47.10^{-7}$ | 2.18 |
| 3 | 199,3 | 0,074 (RSD 0.5%) | 0,002636 | 1118.13 | $1.38.10^{-7}$ | 1.65 |
| 4 | 209,7 | 0,078 (RSD 0.1%) | 0,002559 | 1172.22 | $1.39.10^{-7}$ | 1.57 |
| 5 | 203,9 | 0,076 (RSD 0.5%) | 0,002541 | 1142.45 | $1.38.10^{-7}$ | 1.62 |
| **средно** | **189,7** | **0,071** | **0,002816** | **1056.36** | **$1.40.10^{-7}$** | **1.75** |

* **$k_{екв}$** - еквивалентен коефициент на топлопроводност, който отчита влиянието на стъклената подложка, т.е. коефициент на топлопроводност на системата *стъкло-ТТП*;
** **$k_a$** - изчислен коефициент на топлопроводност на ТТП АКТЕРМ по методика, описана в [2]

Стойностите на коефициента на топлопроницаемост *e* и коефициента на топлопроводност $k_a$ сочат, че материалът е с много добри топлоизолационни свойства. Ниските стойности на ефузията *e* са показател за слаба склонност към топлообмен с околната среда на покритието АКТЕРМ.

По показател коефициент на топлопроницаемост *e, ТТП Актерм* е с по-добри характеристики от тези на класически топлоизолационни материали като керамичната тухла и дървесината, конкурира се с полимерите, но отстъпва на каменната вата и пенополистирола (табл. 2) .

По показател термична дифузия α покритието отстъпва на дървесината и PVC, но превъзхожда керамичната тухла и стъклото. ТТП АКТЕРМ удовлетворява изискванията, които се предявяват към материалите за външна топлоизолация.

***Таблица 2. Топлотехнически характеристики на някои материали [13]***

| *Материал* | e, $Ws^{1/2}/m^2K$ | k, W/m.K | Cp, J/kg.K | α, $m^2/s$ |
|---|---|---|---|---|
| Тухла, керамична | 990-1160 [15] | 0,47 | 840 | $5,2.10^{-7}$ |
| Стъкло, прозоречно | 1300-1500 [14] | 0,81 | 840 | $3,4.10^{-7}$ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Дървесина (смърч) | 400-500 [14] | 0,147 | 1200-2900 | $8,2.10^{-8}$ |
| PVC | 408 | 0,19 | 1260 [15] | $8.10^{-8}$ [11] |
| Каменна вата | 22 | 0,045 | 840 [15] | $3.10^{-6}$ |
| Експандиран полистирол | 30 | 0,04 [12] | 1260 [15] | - |

Специфичният комплекс от топлопроводящи свойства е пряко свързан със структурата на покритието. Множеството сфери с непрекъснат размерен фактор формират тънка защитна термична бариера на повърхността. Кухинността на микрокапсулите осигурява спокойна безвъздушна среда, което допринася за много ниската стойност на коефициента на топлопроводност.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на получените резултатите от настоящото изследване на тънкото топлоизолационно покритие АКТЕРМ могат да бъдат направени следните изводи:

1. Керамичните кухи микросфери притежават форма близка до формата на идеална сфера и са с микрорелефна повърхност. Това е предпоставка за намалено водопоглъщане и добри технологични свойства на синтактната пяна.

2. Композитният материал АКТЕРМ притежава топлопроводящи свойства, отнасящи го в групата на много добрите изолатори. Тънкослойното покритие се конкурира с класически топлоизолационни материали като пенополистирол и каменна вата.

3. Коефициентът на топлопроводност на тънко топлоизолационно покритие АКТЕРМ, определен чрез модифицирания метод на кратковременния топлинен източник, е $k_a$=0,002816 W/(m.K).

4. Получените резултати от изпитванията на образците с TCi анализатора са: за коефициентът на топлопроницаемост e=189,7 $Ws^{1/2}/m^2K$, за термичната дифузия $\alpha=1,40.10^{-7}$ $m^2/s$, за специфичния топлинен капацитет Cp=1056 J/kg.K и за термичното съпротивление R=1,75 $m^2K/W$.

Представените по-горе резултати, анализи и изводи са основание за твърдението, че тънкото топлоизолационно покритие на основата на синтактна пяна АКТЕРМ превъзхожда по топлопроводящи свойства редица класически топлоизолационни материали. Това е още едно доказателство за възможността му да се употребява като външна и вътрешна топлоизолация.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Данилин, Л.Д. Полые микросферы из зол-уноса — многофункциональный наполнитель композиционных материалов, Цемент и его применение, 2012, № 4, с.100-105

[2] Златева П., Петкова-Слипец Р., Сравнителен анализ на резултатите от измервания на коефициента на топлопроводност на топлоизолационно покритие AKTERM, Научни трудове на РУ „А. Кънчев“ том 54, серия 1.2 Топлотехника, хидро- и пневматика. Дизайн и ергономия, ISSN 1311-3321, 2014, стр. 47-51

[3] Рыженков, А. В., Н. А. Логинова, Е. В. Беляева, Е. Е. Лапин, А. Ф. Прищепов, Обзор связующих веществ в синтактных пенах для теплоизоляционных конструкций объектов энергетики, Национальный исследовательский университет „МЭИ”, с.133 – 145

[4] Теряева Т.Н., О.В. Костенко, Ценосферы – сырье для производства синтактных полимерных пен, КГТУ имени Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово

[5] Строителен наръчник в таблици, СЕК, 2006

[6] C-Therm TCi Operator Manual, TH130041 Rev. K

[7] ISO 22007-2 Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity –

Part 2: Transient plane heat source (Hot disk) method (2008) 1-16
[8] John, B., Reghunadhan Nair, C. P., Handbook of thermoset plastics, 2014
[9] [9] Mee, S. J., The Synthesis, Characterisation and Properties of Self-Assembled Hollow and Low Density Microspheres, PhD Thesis, University of Birmingham, May 2011
[10] Sands, B.W., Howes, W.C., Smiley, L.H. *Plast. Eng.* 38 (1982) 31.
[11] Wilson, J., Materials Data, 2007
[12] http://ziegelwerk-eitensheim.de/waermeschutz_03_314.htm
[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_diffusivity#cite_note-eleccool-11
[14] https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmeeindringkoeffizient
[15] http://www.cibsejournal.com/cpd/modules
[16] http://www.akterm.ru

**За контакти:**

Доц. д-р инж. Пенка Златева, катедра “Топлотехника”, ТУ-Варна, тел.: 052-383 341, e-mail: pzlateva1@abv.bg

Доц. д-р инж. Росица Петкова-Слипец, кат. “Строителство на сгради и съоръжения”, ВСУ “Черноризец Храбър”, тел.: 052-359 588, e-mail: rositsa.petkova@vfu.bg

Маг. инж. Алекси Люцканов, катедра “Топлотехника”, ТУ-Варна, тел.: 052-383 341, e-mail: akl@abv.bg

**Докладът е рецензиран.**