FRI-9.2-1-THPE-07

3D MODELING OF THIN THERMAL INSULATING COATINGS

Assoc. Prof. Penka Zlateva, PhD
Department of Thermal Engineering,
Technical University of Varna, Bulgaria,
Tel: + 359 52-383 341
E-mail: pzlateva1@abv.bg

Asist. Prof. Krystin Yordanov, PhD
Department of Thermal Engineering,
Technical University of Varna, Bulgaria,
Tel: + 359 52-383 341
E-mail: krystinkr@gmail.com

Assoc. Prof. Rositsa Petkova-Slipets, PhD
Department of Civil Engineering,
Varna Free University "Chernorizets Hrabar", Bulgaria,
Tel: + 359 52-359 588
E-mail: r_slipets@abv.bg

Eng. Aleksi Lyutskanov, PhD student
Department of Thermal Engineering,
Technical University of Varna, Bulgaria,
Phone: 0888814537
E-mail: akl@abv.bg

Abstract: *The study presents a 3D thermal model of thin insulating coatings, which is developed by using the finite element modeling (FEM). The 3D model is able to achieve temperature distribution with varying combinations of process parameters. The computed temperature field and equivalent thermal conductivity are compared to experimental measurements. The FEM based simulation presents excellent correlation with the experimental results. This study validates the proposed model for thin insulating coatings on the basis of syntactic foams with ceramic microspheres.*

Keywords: *Finite element modelling, Thermal conductivity, Thin insulating coatings.*

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните години все по-широко приложение намират топлоизолационни покрития, които при тънък слой на нанасяне (около 1 mm) имат много добри топлоизолационни свойства. Особено переспективни и най-често срещани са топлоизолационните покрития на водна основа с керамични или стъклени кухи микросфери (Allen M., 2004) (Ryzhenkov A., 2015), т. нар. синтакни пени, които се нанасят като боя и имат значителен енергоспестяващ ефект. Този тип термопокрития, първоначално приложени в аерокосмическата индустрия (Miller R. A., 1997), правят възможно заедно с чисто декоративния ефект да се постигне и топлоизолиране на жилищата като по този начин се осигурява оптимален температурен комфорт в тях. При вътрешно приложение на тънките топлоизолационни покрития, изолационният микрофилм не позволява на топлината да напусне дома, а при външно приложение - ограничава проникването на студа в сградата през зимата, и на топлината през лятото.

Синтактната пяна е ново поколение газонапълнен полимерен композитен материал с много добър комплекс от физико-механични и технологични свойства - ниска плътност, нисък коефициент на топлопроводност, добра обработваемост и относително добра якост. Съществува множество информация – както научна, така и търговска, за тази група

материали, но тя е силно разнопосочна, напр. коефициентът на топлопроводност варира от 0,001 W(/m.K) до 0,2 W/(m.K) (Allen M., 2004) (Ryzhenkov A., 2015) (Bozsaky D., 2015). Това поражда необходимостта от познаване на топлофизичните характеристики на тънкослойните покрития и топлоизолационните системите, в които те участват и от прогнозиране на тяхното топлинно поведение, което може да бъде направено чрез симулационно моделиране (Baker A. J., 2012) (Zienkiewicz O. C., 2000) (Vikhrenko V., 2011).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Симулационно моделиране на тънки топлоизолационни покрития

Цел на настоящата разработка е създаване на симулационен 3D модел за тънки топлоизолационни покрития, който отразявайки спецификата на синтактните пени, да визуализира топлинното им поведението и да дава възможност за оценка на реалното им поведение при изменение на основата, върху която се полагат. Компютърно симулационният модел има за цел адекватно да пресъздаде резултатите от експериментите с изследваното топлоизолационно покритие, получени от използваните методи за измерване на физични величини и да определи с достатъчна точност разпределението на температурата в реалните обекти, заложени в моделите.

Използвани са данни от експериментални изследвания на топлофизичните характеристики на топлоизолационно покритие Актерм (Zlateva, P., 2016), които са определени чрез метода на неограничения плосък слой и модифицирания метод на кратковременния равнинен топлинен източник (C-Therm Technologies TH130041 Rev. K., 2014). За получаване на коефициента на топлопроводност на покритието е използвана методиката, показана в (Zlateva, P., 2016).

В технологията на топлинните процеси решаването на задачи с такъв характер изисква прилагане на алгоритъм (Jaluria Y., 2007) (Liu G.R., 2010). Симулационното моделиране на топлинните процеси се разработва, следвайки следния алгоритъм:

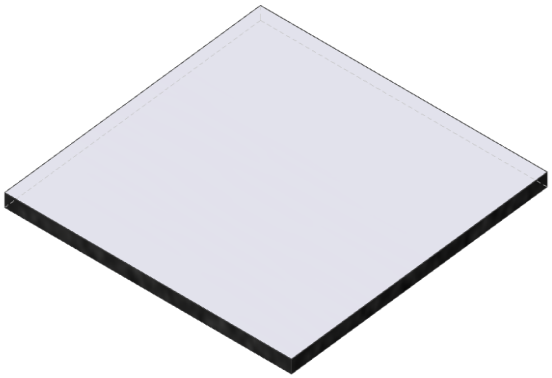
1. Създаване на геометрия в средата на програмен продукт „Autodesk Inventor“;
2. Прехвърляне в програмен продукт „Autodesk CFD“;
3. Задаване на материалите;
4. Задаване на граничните условия;
5. „Дискретизация“ – разделяне на изображението на крайни елементи;
6. Избор на стационарен термичен анализ;
7. Задаване броя на итерациите;
8. Решаване на задачата;
9. Резултати;
10. Анализ на резултатите.

Обект на настоящата разработка е симулационно моделиране на две системи от материали:

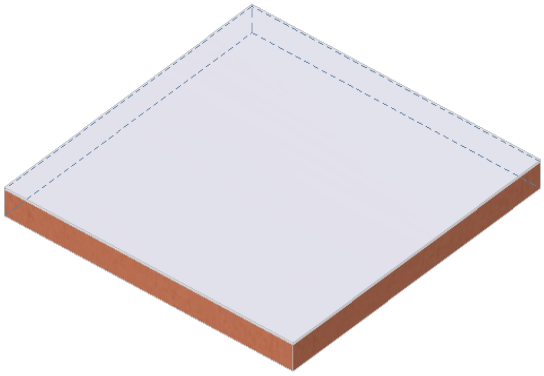
1. *Стъкло - тънко топлоизолационно покритие Актерм* – 2 образеца (СА1 и СА2), фиг.1. Системата е избрана, защото стъклото чрез своята плътна хомогенна структура притежава коефициент на топлопроводност с постоянна стойност. Това я прави по-удачна за моделиране, т.к. се осигуряват константни гранични условия, и за проверка на адекватността на модела.

2. *Гипсокартон - тънко топлоизолационно покритие Актерм*, – 2 образеца (ГА1 и ГА2), фиг.2. Системата е избрана, защото гипсокартонът е един от най-масово използваните материали в жилищното строителство. Наличието на модел на поведение ще позволи да се

прави оценка на поведението на системата при различните й условия на експлоатация. Недостатък от гледна точка на моделирането, обаче, се явява слоеста и пореста структура на гипсокартона, която способства за вариране на стойностите на коефициента на топлопроводност и неговата зависимост най-вече от влажността на основата.



фиг.1. Модел на системата *стъкло – тънко топлоизолационно покритие Актерм*



фиг.2. Модел на системата *гипсокартон – тънко топлоизолационно покритие Актерм*

Свойствата на материалите, участващи в системите са представени в табл. 1. Всички параметри са определение чрез експериментални изследвания (Zlateva, P., 2016) и служат като входни данни за компютърната симулация.

Таблица 1. Топлофизични характеристики на материалите

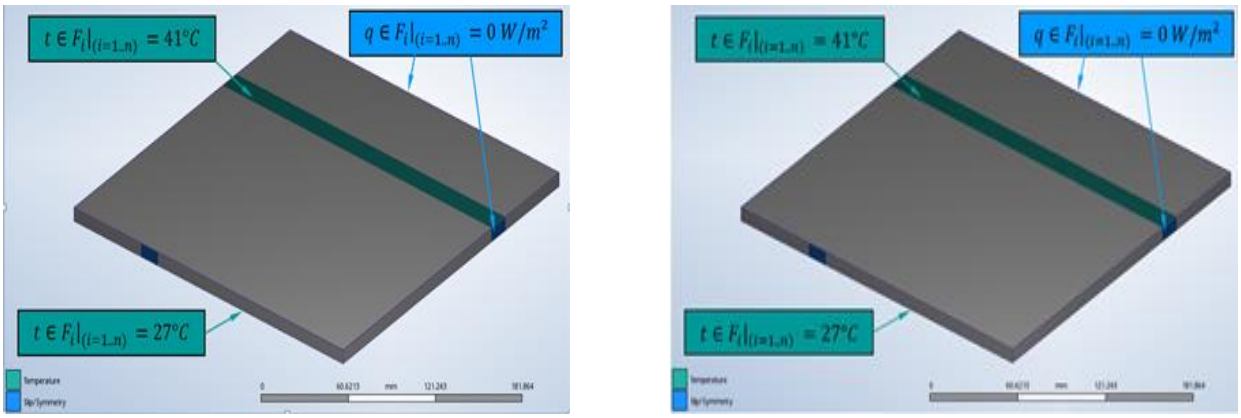
№	Материал	$\delta_м$	$k_м$	$c_{p\,м}$	$\rho_м$
		mm	W/m.K	J/kg.K	kg/m^3
	Стъкло + Актерм	0,413	0,0028	1031,67	430
	Стъкло + Актерм	0,265	0,0022	1213,19	430
	Гипсокартон+Актерм	0,997	0,0024	1139,99	430
	Гипсокартон+Актерм	1,027	0,0025	1110,23	430
		$\delta_м$	$k_м$	$c_{p\,м}$	$\rho_м$
1	Стъкло	8,00	0,81	840	2700
2	Гипсокартон	12,5	0,19	700	800

За моделирането на процеса на топлопренасяне е избрана геометрия на обекта за изследване - две пластини. Геометриите са създадени в програмен продукт Autodesk Inventor.

Симулирането на топлинните процеси в пластините е извършено със софтуерен продукт за флуиден и термичен анализ „Autodesk CFD“ (Ascent, Center for Technical Knowledge, 2016), който е подходящ за целите на изследването (Bergheau J.-M., 2008) (Lee T.W., 2008). Използван е стационарен термичен анализ.

Съставени са зависимости спрямо температурата - $k = k(t)$, $\rho = \rho(t)$, $c_p = c_p(t)$ и др., като е изградена нова библиотека в софтуерния продукт „Autodesk CFD“.

Зададените гранични условия са представени чрез фиг. 3а и фиг. 3б. Температурите на студената и топлата плоча са съответно 27ºC и 41ºC.

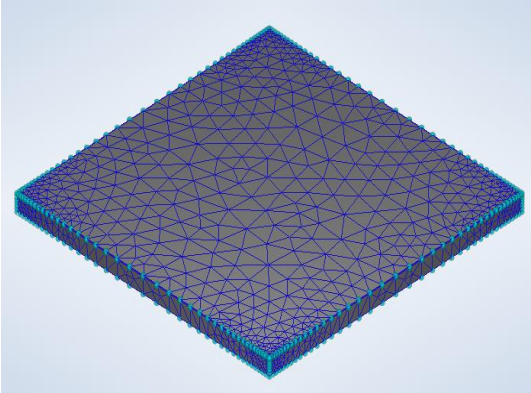


а) Система *стъкло – тънко топлоизолационно покритие Актерм*

б) Система *гипсокартон – тънко топлоизолационно покритие Актерм*

фиг.3. Гранични условия за компютърна симулация на тънко топлоизолационно покритие при стационарен термичен анализ

Дискретизация на пластината е генерирана по метода на крайните елементи (фиг. 4) и представлява апроксимиране на системата от призматични, паралепипедни и хексагонални елементи, които са разделени на твърди за двата разгледани случая. Задаването на дискретизацията е в режим на автоматично оразмеряване.



фиг.4. Дискретизация

Броят на елементите и възлите в разглежданите системи е даден в табл. 2.

Таблица 2. Изходни данни от дискретизацията

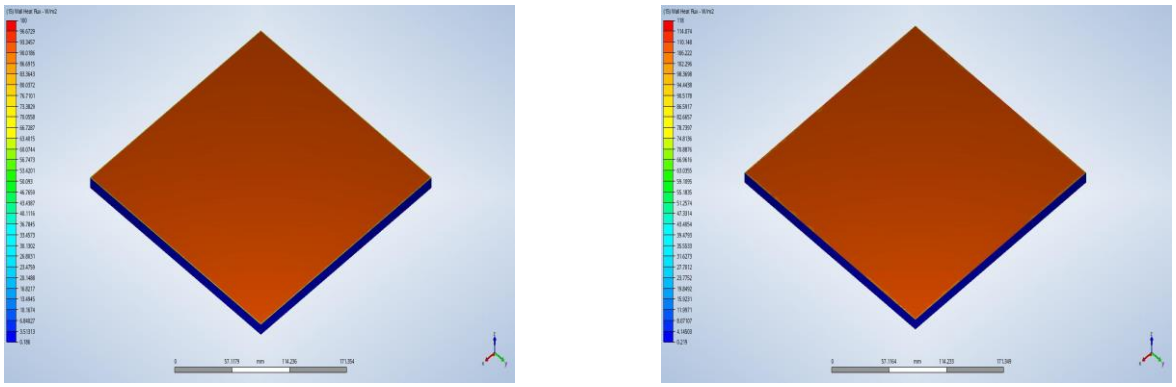
Образци	СА1	СА2	ГА1	ГА2
Общ брой елементи	10133	9485	10821	14021
Общ брой възли	2744	2593	3017	3801

Математичното моделиране на стационарния термичен анализ е извършено чрез диференциалното уравнение (Ascent, Center for Technical Knowledge, 2016):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[k\frac{\partial T}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[k\frac{\partial T}{\partial z}\right]=0 \qquad (1)$$

Резултати и анализ

Моделирането на системата *стъкло – тънко топлоизолацонно покритие Актерм* - СА1 и СА2, в средата на програмен продукт Autodesk CFD е представено на фиг. 5.



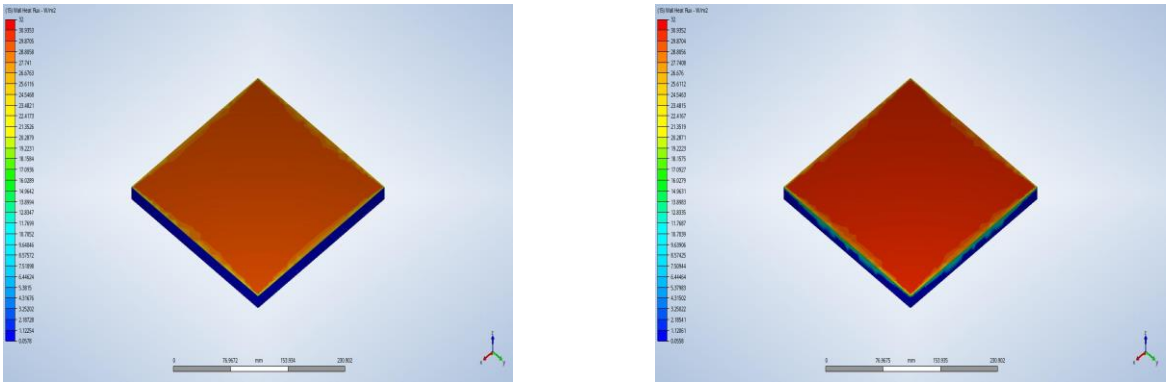
а) образец СА1 б) образец СА2

фиг.5. Топлинен поток, генериран чрез компютърна симулация, за системата *стъкло – тънко топлоизолационно покритие Актерм*

Резултатите от симулационното моделиране (фиг. 5а и 5б) са адекватни на получените при експерименталните изследвания (Zlateva P., 2014).

Получените резултати за системата *стъкло – тънко топлоизолационно покритие Актерм* дават основание да се счита, че разработената компютърна симулация е функционираща и адекватна, и може да бъде прилагана за други системи при аналогични гранични условия.

Симулационното моделиране за пластини от системата *гипсокартон – тънко топлоизолацонно покритие Актерм* - ГА1 и ГА2, в средата на програмен продукт Autodesk CFD е представена на фиг. 6.



а) образец ГА1 б) образец ГА2

фиг.6. Топлинен поток, генериран чрез компютърна симулация, за системата *гипсокартон – тънко топлоизолационно покритие Актерм*

Симулационниото моделиране (фиг. 6а и 6б), демонстрира добра повтаряемост на получените резултати от експериметалните изследвания (Zlateva P., 2014).

Сравнителният анализ от симулационното моделиране на изследваните образци (фиг. 5 и фиг. 6) показва добра повтаряемост и адекватност на получените резултати за изследваните образци с основи стъкло и гипсокартон и нанесеното върху тях тънкослойно топлоизолационно покритие. Прилагането на числени методи и програмни продукти за симулационен анализ е крачка напред при решаването на задачи от такъв характер.

ИЗВОДИ

Въз основа на проведеното математическо моделиране по-горе и получените резултати за топлоизолационното покритие Актерм върху стъкло и гипсокартон, може да бъдат направени следните изводи:

1. Разработеният алгоритъм за 3D моделиране на топлинни процеси при различни топлоизолационни материали и покрития, позволява използването на програмни продукти с помощта, на които може да се предскаже протичането на процесите, като се варира с изходните параметри.

2. Симулационното моделиране на стационарна топлопроводност в изследваните пластини с основи стъкло и гипсокартон с нанесено тънкослойно топлоизолационно покритие чрез математичния модел адекватно пресъздава протичащите топлинни процеси в тях и показва добра повтаряемост на получените резултати.

REFERENCES

Allen, M., Baumgartner, R., Fesmire, J., Augustynowicz, S. (2004). *Advances in microsphere insulation systems*. AIP Conference Proceedings, 710:1, 619-626.

Ascent, Center for Technical Knowledge. (2016) *Autodesk CFD 2017 Essentials*, Autodesk Authorized Publisher Paperback. (1st Edition).

Baker A. J. (2012). *Finite Elements – Computational Engineering Sciences*, Wiley.

Bergheau J.-M., Roland F. (2008). *Finite Element Simulation of Heat Transfer*, Wiley.

Bozsaky, D. (2015). *Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating*. Procedia Engineering (123), 68-75.

C-Therm Technologies TH130041 Rev. K. (2014). *C-Therm TCi Operator Manual*.

Jaluria Y. (2007). *Design and Optimization of Thermal Systems*, 2 Edition, CRC Press.

Lee T.W. (2008). *Thermal and Flow Measurements*, CRC Press.

Liu G.R., Thoi T. (2010). *Smoothed Finite Element Methods*, CRC Press.

Miller, R. A. (1997). *Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions*, Journal of Thermal Spray Technology 6:35

Ryzhenkov, A., Pogorelov, S., Loginova, N., Belyaeva, E., Plestsheva, A. (2015). *Syntactic foams efficiency with the use of various microspheres for heat supply equipment and pipelines heat insulation*. Modern Applied Science (9), 319-327.

Vikhrenko V. (2011). *Heat Transfer – Engineering Applications*, InTech.

Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor. (2000). *The Finite Element Method –The Basis*, Fifth Edition, Butterworth Heinemann.

Zlateva, P., Petkova-Slipets, R., Lyutskanov, A. (2016). *Analysis of the structure and heat conducting properties of the insulating coating Akterm*, Proceedings of University of Ruse - 2016, (55), 41-48.

Zlateva, P., Petkova-Slipets, R. (2014). *Study of thermal insulating coating AKTERM behaviour using an infrared thermography*, CAx Technologies (2), 30-33.