

Nanotechnológia alkalmazása az építőiparban energiatakarékosság, környezetvédelem, betontechnológiák

Dr. Orbán József professor emeritus PTE



Bevezető gondolatok a nanotechnológiáról

A nanoanyagok jellemzői:

A nano mértékegység: $\varnothing =$ hajszál $0,15 \text{ mm} = 150 \mu\text{m} = 150.000 \text{ nm}$
Új tulajdonságok jelennek meg: nagy a fajlagos felület > tömbi forma
nő a reakcióképesség és a szilárdság

Nanotechnológia jellemzése: $< 100 \text{ nm}$, folyamatok végbemenése

Az egyes folyamatok leírásához: kvantummechanikai ismeretek

Mikró (μm) és nanoméretű (nm) anyagtechnológiák keveredése

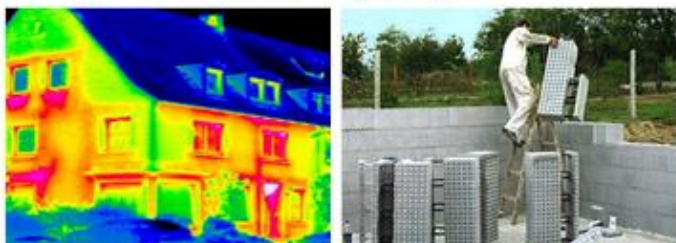
A „nano” mint kiváló tulajdonság, márkajelzés, reklám

Ismeretterjesztési hiányosságok, kémia oktatás, szakirodalom hiány

Nanotechnológia alkalmazási területei az építőiparban:

1. Energiatakarékosság: - hatékony hőszigetelő anyagok
- hővédő vékonybevonatok és festékek
2. Környezetvédelem: - öntisztuló épülethomlokzatok
- légszennyezettséget csökkentő felületek
3. Építmények védelme: - betontechnológiai alkalmazások
- szálerősítés, vízzáróság, fagyállóság

Épületek hatékony hőszigetelése



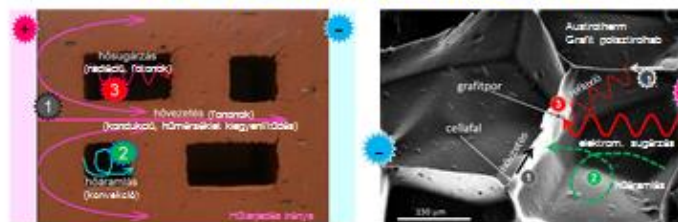
Épületek hővesztessége

Fokozott hőszigetelésű falszerkezet

Igény a hőszigetelés hatékonyságának növelése

- A **kis energiafogyasztású** épületek igen hatékony hőszigetelést igényelnek. (2021.-től nulla energiafogyasztású lakóépületek $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- A hőszigetelő anyagok **hatékonyságának korlátai** (a levegő szigetel)
- A szigetelőréteg **vastagsága korlátozott** (műemléki épületek, belső oldali)
- Hatékony hőszigetelő anyagok: **nanotechnológia** (nano-porozitás)

A hő terjedésének formái az építőanyagokban



Hőátadás a kerámia falazóelemben

A polisztirol cellaszerkezete

Hőtranszport folyamatok a szilárd anyagban: (hőátadás, hőközlés, hő csere, hő átvitel)

Az anyag hőmérséklete: Az atomrács mechanikai rezgési-energiája (**rácsrezgés**).

1. **Hővezetés:** Részecskéről részecskére adódik át a hő az anyagban (**kiegyenlítő hatás**)
Dielektrikum, a molekulák hullámszerű rezgőmozgása szállítja a hőt (**fononok**).
2. **Hőáramlás:** Mozgó anyagrészecskék, gáz- és vízmolekulák közvetítik a hőt.
A mikró méretű zárt cellákban minimális konvekciós hőáramlás.
3. **Hősugárzás:** Elektromágneses sugárzás formájában (infra, fotonok) terjed a hő.
A sugárzást visszaverő grafitpor szemcsék hűtőként működnek.
A hősugárzás reflexiója miatt: $\lambda = 0,038 \rightarrow 0,032 \text{ W/m}^2\text{K}$ (-20%)

Nanopórusos hőszigetelő anyagok



A nanostruktúrájú aerogel szerkezeti felépítése

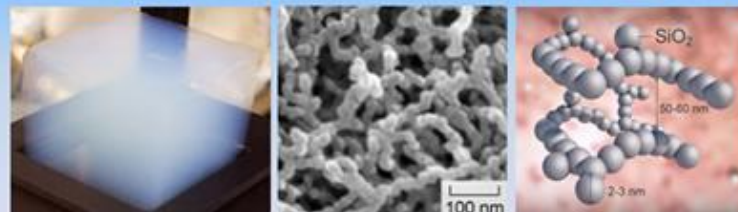
Aerogél: szilícium dioxid alapú nano gömbök „pókháló” szerkezete.

A molekuláris szerkezetű **nanopórusok előállítása:**

- $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (vízüveg) összekeverik nagy nyomáson
- a vízmolekulákat kicserélik cseppfolyós földgázzal
- normális légköri nyomáson a gáz eltávozik, molekula nagyságú **nano-pórusokat** hagyva maga mögött (pórusméret $5 + 100 \text{ nm}$)

A szilika aerogél **szilárdhab tulajdonságai:**

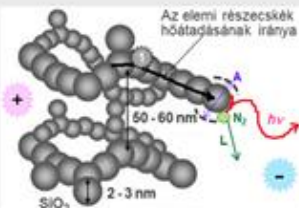
- szuperkönnyű: $\rho_1 = 1,9 \text{ kg/m}^3$ $\lambda = 0,013 \text{ W/mK}$ (levegő: 1,3 és 0,024)



A nanopórusos hőszigetelő anyag (aerogél) szerkezeti felépítése

Hőközlési módok a nanopórusos anyagban (hőtranszport folyamatok):

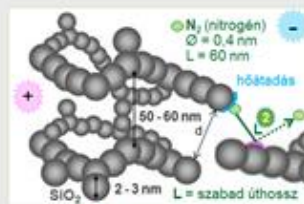
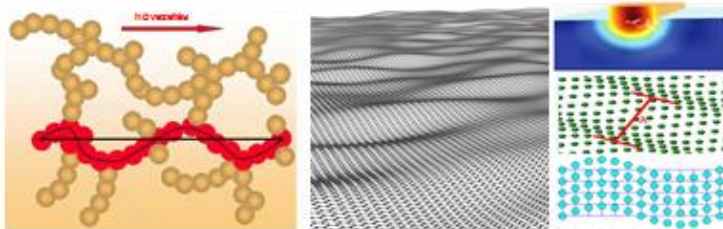
- 1 **Hővezetés:** Részecskéről részecskére, rezgő mozgással adódik át a hő. Dielektrikum anyagokban, rácsrezgéssel történik hővezetés. (rácsrezgési energia kiegyenlítődség, energia kvantumai a fononok)
- 2 **Hőáramlás:** Mozgó anyagrézcskék (folyadék, gáz) közvetítik a hőt. A nanopórusokban nincs a konvekciós hőáramlás. A pórusokban érvényesül a Knudsen effektus ($L > d$).
- 3 **Hősugárzás:** Az elektromágneses sugárzás (kvantumai a fotonok, infravörös). A hősugárzás absorbeálódik és szétszóródik (reflexió).



A hővezetés mechanizmusa szilárd anyagban

A hő rácsvezetése (rácsrezgés):

- A molekulák hőközléssel **gerjesztődnek**.
- Hőátadás csak lineárisan, sok a „zsákutca”.
- Növekszik a molekulák rezgésintenzitása „rácsrezgése” és amplitúdója (A) (hő-tágulás).
- Gyengül a molekulák közötti kötőerő (ionos).
- Vegyértékelektronok (e) magasabb energiaszintre kerülnek (foton kibocsátás).



A hőáramlás (konvekzív hőátadás) mechanizmusa

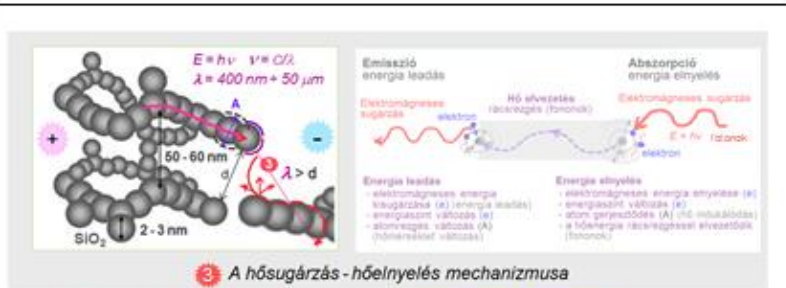


Knudsen effektus

A nanopórusok üregei (d) kisebbek, mint a bennük levő gázmolekulák **utközéséhez szükséges közepes szabad út hossza (L).**

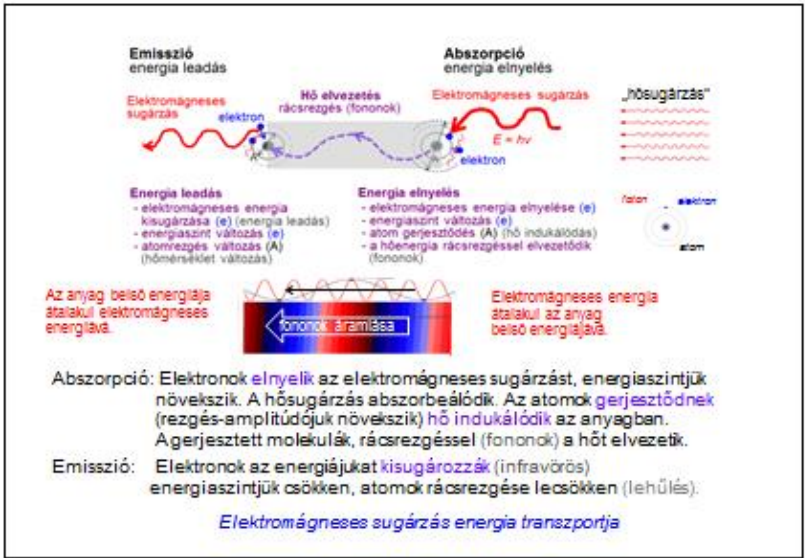
Hőközlési módok a nanopórusos anyagban (hőtranszport folyamatok):

- 1 **Hővezetés:** Részecskéről részecskére, rezgő mozgással adódik át a hő. Dielektrikum anyagokban, rácsrezgéssel történik hővezetés.
- 2 **Hőáramlás:** Mozgó anyagrézcskék (folyadék, gáz) közvetítik a hőt. A nanopórusokban nincs a konvekciós hőáramlás. A pórusokban érvényesül a Knudsen effektus ($L > d$).
- 3 **Hősugárzás:** Az elektromágneses sugárzás (kvantumai a fotonok, infravörös). A hősugárzás absorbeálódik és szétszóródik (reflexió).



Hőközlési módok a nanopórusos anyagban (hőtranszport folyamatok):

- 1 **Hővezetés:** Részecskéről részecskére, rezgő mozgással adódik át a hő. Dielektrikum anyagokban, rácsrezgéssel történik hővezetés.
- 2 **Hőáramlás:** Mozgó anyagrészecskék (folyadék, gáz) közvetítik a hőt. A nanopórusokban nincs a konvekciós hőáramlás. A pórusokban érvényesül a Knudsen effektus ($L > d$).
- 3 **Hőszűrés:** Az elektromágneses sugárzás (kvantumai a fotonok, infravörös). A hőszűrés abszorbeálódik és szétoszlik (reflexió).



Aerogél hőszigetelő paplan és tulajdonságai

Aerogél hőszigetelő paplan tulajdonságai:

- üvegszövet térhálóba ágyazott aerogél lemez
- hatékony hőszigetelés $\lambda = 0,013 \text{ W/mK}$
- víztaszító, és páraáteresztő ($\rho_a = 150 \text{ kg/m}^3$)
- hajlítható és vakolható

Felhasználás: - műemléki épületek hőszigetelése
- hőhidak utólagos szigetelése
- épületgépészeti szerelvények
- energia ipar (-40 + 200°C)

Aerogel hőszigetelő paplan építőipari alkalmazása



Nanogel aerogél hőszigetelő üveg alkalmazása

Nanopórusos aerogél hőszigetelő üveg

- SOLERA (üvegpórus) + NANOGEL (aerogél) hőszigetelő, napfényáteresztő épületszerkezeti üvegelem.

Tulajdonságok: - $\lambda = 0,009 - 0,012 \text{ W/mK}$
 - napfényvilágításnál áttetsző
 - könnyű, porozitása 97%

Alkalmazás:

- létesítmények hőszigetelő bevilágítása
- válaszfalak és erkélykorlát elemek



CABOT nanogel aerogel

Nanotechnológiás vákuum hőszigetelés



Vákuumpanel szerkezete

Redőnytok és tetőfödém hőszigetelés

VIP vákuum hőszigetelő panelek:

- Nanoméretű (SiO_2) porból préselt „fenyőfák halmaza” (a nanopórusos szerkezetben kevés a hőátadási pont)
- A pórusok mérete gátolja a hőáramlást és a hőszugárzást.
- A panel vákuumozása (5 mbar belső nyomás).

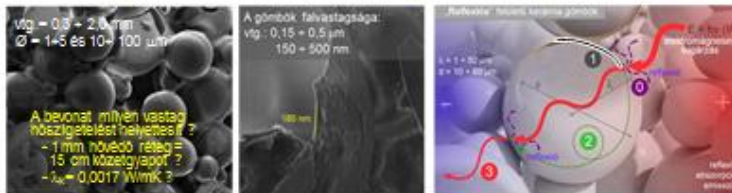
Műszaki adatok:

$\rho_t = 160 \text{ kg/m}^3$ Nyomószilárdság: 200 kPa (lépésálló)
 $\lambda = 0,019 \text{ W/mK} \rightarrow$ vákuumozva: $\lambda = 0,005 \text{ W/mK}$



Alkalmazás: utólagos épület-felújítások, hőhidak, bejárati ajtók, redőnytok alacsony energiafogyasztású ház $U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (5 cm vtg.)

Épületek hővédelme kerámia gömbös vékonybevonattal

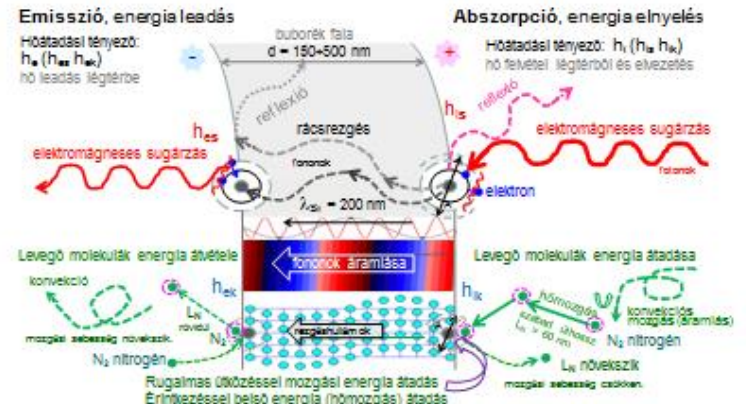


A kerámia „gömbök” szerkezete és hőszigetelési mechanizmusuk

Hőközlési módok a kerámia gömbös bevonatban (hőtranszport folyamatok):

- 0 Az elektrom. „hőszugárzás” reflexiója miatt csökken a hőátadás a gömbfelületen. Félvezett az energia elnyelés (abszorpció) és az energia leadás (emisszió).
- 1 A hővezetést befolyásolja: az anyag dielektikum és kicsi az érintkezési felület. Gömbök falában korlátozott a rácsrezgéses hőszállítás ($\lambda_{\text{rács}} \text{ fonon} \approx \text{vtg}$).
- 2 Minimális a konvekciós hőáramlás, a gömb belsejében (vákuumtér)
- 3 Belső tér sugárzásos hőátadása ($\lambda_{\text{interna}} \approx d$) és csökken a reflexiók felületen.

A hőszigetelő képességet mérséklik a bevonat kötő-, adalék- és színező anyagai.



Abszorpció: elektronok elnyelik az elektromágneses sugárzást, energiaszintjük növekszik. Az atomok gerjesztődnek (rezgés-amplitúdójuk növekszik) hő indukálódik az anyagban. A gerjesztett molekulák, rácsrezgéssel a hőt elvezetik (a gömb, mint fonon csabda $d = \lambda$.)

A hővédő vékonybevonat hőtranszport folyamatai

A hővédő vékonybevonatok tulajdonságai

A bevonat **hőszigetelő képessége** nem helyzetfüggő, mint pl. polisztírol $\lambda = \text{const.}$

A bevonathővédelmének (szigetelésének) **hatékonysága** változó:

- a bevonathatékony alkalmazása: $t > 200^\circ\text{C}$ **sugárzásos hő**
- energia megtakarítás nem arányos a **vastagsággal**: 0,25 mm vtg. 20%
2,00 mm 40% ?

A bevonati réteg hőszigetelő képességét (λ_{bevonat}) befolyásolják:

- a hőközlési módja (sugárzásos ill. konvektív hőátadás)
- a felületi réteg anyagszerkezete (telítettség, nanostruktúra)



λ érték meghatározása:

λ_k értékét a modell megnövekedett hőátbocsátási ellenállásából (R_{max}) számolják ki:

$$R_{\text{max}} = R_2 + R_3 + R_4 = 1/h_3 + d/\lambda_k + d/\lambda_k + 1/h_4 \text{ m}^2\text{K/W}$$

modelltől függő $\lambda_{\text{kegyenesített}}$ = 0,001 + 0,0017 W/mK (névleges érték)

a vékonybevonat $\lambda_{\text{kegyenesített}}$ = 0,014 W/mK (tényleges érték)



A hővédő vékonybevonat hőtranszport tulajdonságai:

- a bevonathő pajzsként működik (nem hő tükör)
- hővédelmi hatása a légtérrel érintkező felületen hatékony
- a hőátadási tényezők (h , és h_w) eltérnek a normális anyagokétól

Hőátbocsátási tényező:

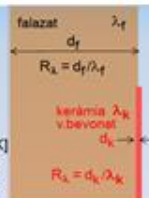
$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \text{ W/m}^2\text{K}$$

R - hőátbocsátási ellenállás (a hőárammal szembeni ellenállás)

$$R = \sum R_i + R_n \text{ m}^2\text{K/W}$$

R_x - hővezetési ellenállás $R_x = d/\lambda$, $m^2\text{K/W}$ d - rétegvastagság [m]
 λ - hővezetési tényező [W/mK]

R_n - hőátadási ellenállás $R_n = 1/h_1$ és $1/h_2$ h_1 - belteri hőátadási tényező
 h_2 - kültéri hőátadási tényező



jég
 $C = 2,1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ (lághő, hő kapacitás)
 $\lambda = 2,25 \text{ W/mK}$
 $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$
 0°C

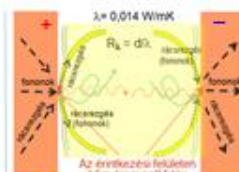
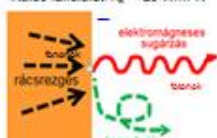
Érintkezési felületen hőmérsékletkiegyenlítődéssel

jég
 $C = 2,1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$
 $\lambda = 2,25 \text{ W/mK}$
 $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$
 0°C

rezsó
 $C = 0,8 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ (lághő)
 $\lambda = 0,014 \text{ W/mK}$
 $\rho = 120 \text{ kg/m}^3$
 200°C

Belső fafelület $h_1 = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$

Külső fafelület $h_2 = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$



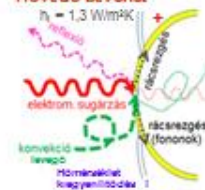
A hőfelvétel és hőleadás folyamata az anyagok felületén

A hő transzport folyamatok a falszerkezet hőszigetelő rétegében

Hővédő bevonat

$h_1 = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Külső fafelület $h_2 = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$



A hőfelvétel és hőleadás folyamata a bevonat felületén



A hőátadás illusztrációja

A vékonybevonat hő felvételi-és hő leadási folyamatai

TSM Ceramic Технические характеристики

| Наименование характеристики | Единица измерения | Величина | Примечания |
|--------------------------------------|-------------------|------------|--------------|
| Теплопроводность при 20 °С, не более | Вт/м °С | 0,001 | ГОСТ 1076-87 |
| Теплоемкость (сж. + мж.) | Вт/м³ °С | 1,29 - 2,5 | ГОСТ 1076-87 |

У жидких керамических теплоизоляционных покрытий, в том числе и у TSM Ceramic, коэффициенты теплоемкости (гораздо) ниже приведенных СНиПом 8,7 и 23 единиц.

A szilárd falazat és a levegő közötti hőcsere hő átadással (hőmérséklet kiegyenlítődéssel) megy végbe, jellemzője a „h” hő átadási tényező. (szilárd - levegő; szilárd - szilárd)

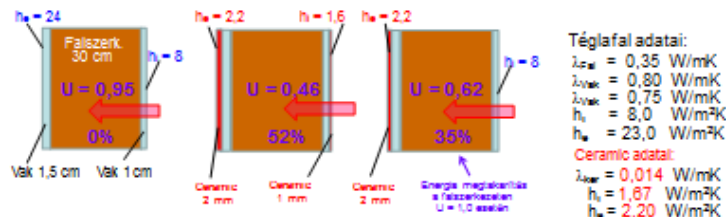
Hőátadási tényező (h_{1k} , h_{1w} ; h_{2k} , h_{2w} ; h_{3k} , h_{3w}) értékeit befolyásolják:

1. A falazat anyagának tulajdonságai:
 - az anyag hő kapacitása, fajhője „C” J/kgK
 - az anyag „ λ ” W/mK és sűrűsége „ ρ ” kg/m³
2. A áramló közeg (levegő) tulajdonságai:
 - az áramlás jellege és sebessége
 - az áramló közeg tulajdonságai („C” „ λ ” „ ρ ”)
3. A falszerkezet felületének anyagstruktúrája:
 - a falazat felületének reflexiós- és abszorpciós tényezői
 - felületi réteg nanostruktúrája és hő transzportja

A „ h_1 ” és „ h_2 ” hőátadási tényezők kimérése folyamatban van.

A hőátadási tényező értelmezése és értékei





Hőátbocsátási tényező: $U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_e}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_{\text{ker}}}{\lambda_{\text{ker}}} + \frac{d_{\text{vak}}}{\lambda_{\text{vak}}} + \frac{d_{\text{te}}}{\lambda_{\text{te}}} + \frac{d_{\text{vak}}}{\lambda_{\text{vak}}} + \frac{d_{\text{ker}}}{\lambda_{\text{ker}}} + \frac{1}{h_e}} \text{ [W/m}^2\text{K]}$

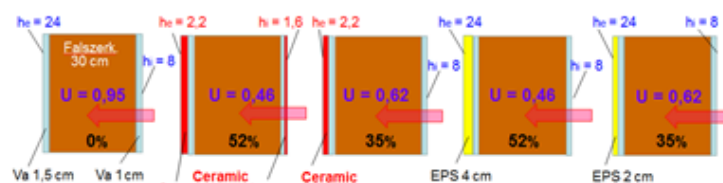
$U = \frac{1}{\frac{1}{1,87} + \frac{0,001}{0,014} + \frac{0,01}{0,75} + \frac{0,3}{0,35} + \frac{0,015}{0,81} + \frac{0,002}{0,014} + \frac{1}{2,20}} \text{ [W/m}^2\text{K}] \quad 0,46$

A hőátadási tényezők
 h_i : $h_{\text{konv.}}$ és $h_{\text{szugárz.}}$
 h_e : $h_{\text{konv.}}$ és $h_{\text{szugárz.}}$
 meghatározása???

Eredeti téglafal:
 $U = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$

Hővédelemmel ellátott fal:
 $U = 0,46 \div 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$

Az energiafelhasználás csökkenésének meghatározása



Alkalmazási területek: - műemléki épületek hőszigetelése és hővédelme
 - belső oldali falak- és hőhidak szigetelése
 - épülethomlokzatok és tetőszerkezetek hővédelme
 - energiaipari vezetékek és berendezések hővédelme



A hővédő vékonybevonatok építőipari alkalmazása

Hőszigetelő festékek és hővédő bevonatok



Thermo Shield „hőpajzs” (hőszigetelő festék) (USA, Német)
 Műszaki adatok: rétegvastagság: kb. 0,3 mm $\lambda = 0,014 \text{ W/mK}$



Protektor hőszigetelő festérendszer, bevonat
 Jellemzők: $\lambda = 0,014 \text{ W/mK}$ reflexió: 60- 80%



TSM Ceramic hőszigetelő bevonat (Orosz, Ukrán)
 Igen hatékonyan szigetelik a sugárzó hőt (35 + 50%)
 Jellemzők: $\lambda_{\text{névleges}} = 0,001-0,0017 \text{ W/mK}$



Thermo-S kerámia hőszigetelő bevonat
 Rétegvastagság: 0,5 + 2,0 mm homlokzatra és betonra.



Super Therm[®] reflexió hőszigetelő festékbevonat
 Jellemzők: a hőszugárzás (Nap) 95%-át visszaveri(?)
 70% energia csökkenés, 0,25 mm vtg. = 15 cm üvegyapot(???)



MahlMart nanotechnológiás hőszigetelő bevonat
 ATSM Ceramic, szigeteli a sugárzó hőt, $C > 200^\circ\text{C}$



MANTI Ceramic nanokerámias hővédő vékonybevonat
 Saját termékfejlesztés, hatékony reflexió, h_i és h_e alkalmazása

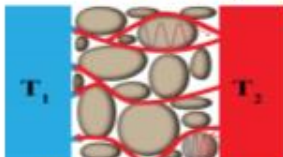
MANTI Ceramic hővédő vékonybevonat termékfejlesztése

- A bevonat kötőanyag igényének csökkentése:
 - frakcionált kerámia gömbök alkalmazása (1+10 és 10+100 μm)
 - nem törékeny alkáli-boroszilikát és alumíniumszilikát kerámia gömbök
- A hővédő bevonat rugalmasságának növelése (nyomástűrő, nem törékeny):
 - gáztöltésű 1+10 μm átmérőjű műanyag gömbök bekeverésével
 - tömör 10 + 600 nm méretű műanyag golyók bekeverése
- Az alkalmazástechnikai tulajdonságok javítása:
 - a bevonat reflexióját javító anyagok adagolása: 300 nm TiO_2 (szuszpenzió)

Hővédő vékonybevonatok alkalmazásának tapasztalatai

- Alkalmazásuk előnye: vékony réteg, anyagfelhasználás, gyorsaság, tűzvéd.: A2
 energia megtakarítás kb.: 30 + 50% $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K} \rightarrow 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Belsőoldali hővédő réteggént alkalmazva, fékezett a falfelület hőelvezetése (nem hőtükör jelenség!) ezért a falfelület hamar felmelegszik, egyenes hő-elosztást biztosítva a falfelületen. Fékeződik a hőhidak hatása, melynek következtében csökken a páralecsapódás és a penészképződés.
- A hőszigetelt falszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének (U) számítása:
 - meg kell határozni a nanostruktúrájú falfelületek hőátadási tényezőit
 - ki kell egészíteni a WinWatt épületenergetikai program adatbázisát

A nanotechnológiás hőszigetelő festék tulajdonságai (BME)



Hőterjedés a vákuumkerámias hőszigetelő festékanyagon keresztül

A hőterjedés a kerámia gömbös festékben:
A festékanyag, mint egy egybefüggő hőszigetelő réteg.
A hővezetési tényezőben a festékanyag vezetési hőterjedése dominál:

$$\lambda_{eff} = \lambda_{V,kerámia} + \lambda_{V,levegő} + \lambda_{ES(hővezet)} + \lambda_{K(zárk. konv.)}$$

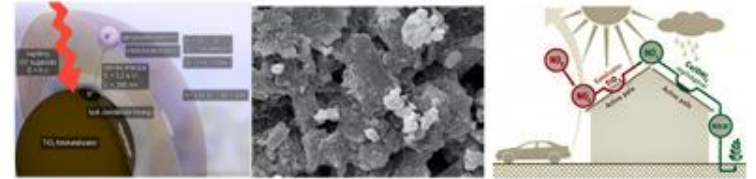
- Nem tájra fel azon törvényszerűségeket, melyek a vákuumgömbökön keresztüli hőterjedésre és azok hőszigetelő képességére vonatkoznak.

A hővédő vékonybevonat hőtranszport tulajdonságai (PTE, Orbán)



Hőközlési módok a kerámia gömbös bevonatban

- 0 A külső gömbfelületen fékezett az energia elnyelés (abszorpció) a „hősugárzás” reflexiója miatt.
 - 1 A hővezetést befolyásolja, hogy a gömbök falában korlátozott a rácsrezgéses hőszállítási $(\lambda_{cs} \approx \gamma_{cs} \approx vT)$. Az anyag dielektrikum és kicsi az érintkezési felület.
 - 2 A gömb belsejében minimális a konvekciós hőáramlás.
 - 3 Belső tér sugárzásos hőtáradása $(\lambda_{cs} \approx d)$ csökken a reflexiós felületen.
 - 4 Megváltozik a bevonat felület hőtáradási tényezője.
- A hőszigetelő képességet mérsékelik a kiegészítő anyagok.
- Túlzott jelentőséget tulajdonít a bevonat nanostruktúrájának.



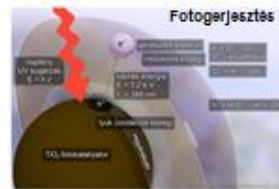
Nanotechnológia környezetvédelmi alkalmazásai öntisztuló beton- és üvegfelületek, épülethomlokzatok



A fotokatalízis reakcióval öntisztuló felületek

A fotokatalízis reakció:

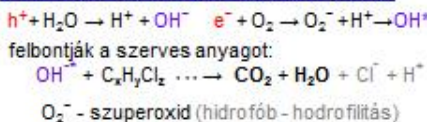
- Az UV sugárzás gerjeszti (aktiválja) a félvezető TiO_2 vegyértékelektronját.
- A gerjesztett vegyértékelektron, magasabb energiaszintű pályára kerül (foto-gerjesztés).
- Elektron (e^-) és lyuk (h^+) párok keletkeznek, redukciós és oxidációs közeget hoznak létre.



TiO_2 fotokatalízis reakciója

A vegyértéksáv és a vezetősáv közötti energia különbség: $E = 3,2 \text{ eV} = h \times c/\lambda$
A fotogerjesztéshez szükséges fény hullám hossza: $\lambda = 388 \text{ nm}$ (Lágy UV sugárzás)

Az oxidációs és redukciós közegek reakciói:

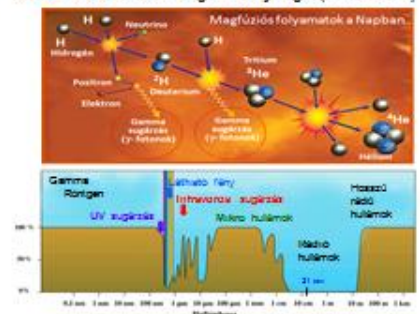


A Nap elektromágneses sugárzása:

Hullám formájában terjed, részecskéi (kvantumai) a fotonok.
A fotonok energiája: $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$
A fény hullám hosszától (λ) függ.
 h - Planck állandó ($4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$)
 c - a fény sebessége ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)
 ν - a fényenergia frekvenciája
 λ - a fény hullámhossza
 $E = 3,2 \text{ eV} \rightarrow \lambda = h \cdot c/E = 388 \text{ nm}$

A Nap elektromágneses sugárzása

Az energia, elektromágneses hullám formájában terjed, akkor alakul hőenergiává, amikor egy anyag elnyeli. A sugárzás egysége (kvantuma) a foton.
A Nap magfúziós reakciói: $H + {}^2H \rightarrow {}^3He + \gamma$ fotonok elektromágneses sugárzás $\rightarrow \gamma$ rádióhullám).
Minél kisebb a sugárzás hullámhossza, annál nagyobb az általa hordozott energia mennyisége. ($E = h\nu = hc/\lambda$)



A Föld légkörének elektromágneses-sugárzás átteresztő képessége

| Sugárzás | Hatása az anyagra |
|----------------------|--|
| Rádióhullámok | Nincs hatással az anyagra |
| Hosszúhullám | |
| Középhullám | |
| Rövidhullám | |
| Ultrarövid hullám | |
| Mikrohullám | Molekulákat forgatja |
| Infravörös sugárzás | Elnyelődik atomokat gerjeszt hő indukálódik |
| Távolsági infravörös | |
| Közepes infravörös | |
| Közelinfravörös | |
| Látható fény | |
| Vörös | Elnyelődik és reflektálódik kevés hő indukálódik |
| Narancs | |
| Sárga | |
| Zöld | |
| Kék | |
| Ibolya | Elektronokat gerjeszt aktiválja fotokémiai hatás |
| Ultrarövid sugárzás | |
| Lágy UV | |
| Kemény UV - A | |
| UV - B | |
| UV - C | Ionizáló és roncsoló |
| XUV | |
| Röntgen sugárzás | |
| Gamma sugárzás | |

A Nap elektromágneses sugárzásának spektruma és hatása az anyagra

A fotokatalízis reakcióval öntisztuló beton- és üvegfelületek

Fotokatalitikus (TiO₂) cementadagolású betonfelületen OH[•] OH⁻ ionok keletkeznek:

- szennyeződés lebomlik
- a felület öntisztulóvá válik



Öntisztuló betonfelület és épülethomlokzat Richard Meier jubileumi templom Rómában

A TiO₂ bevonatú üvegfelületen fotokatalitikus reakciók: OH[•]; O₂⁻

- OH[•] öntisztulás
- O₂⁻ szuper hidrofilitás
- egyeneses vékony vízréteg
- vízcseppmentes felületet



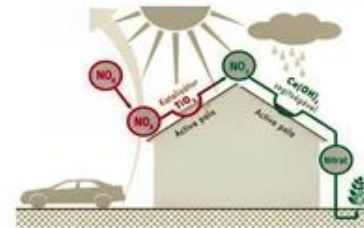
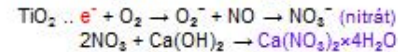
Öntisztuló üvegfelület

Légszennyezettséget csökkentő beton- és síkpadla felületek

Fotokatalitikus TiO₂ tartalmú TioCem cement környezetvédelmi alkalmazása

A légszennyezést okozó nitrogénoxidok NO_x mennyiségét csökkenti a TiO₂ tartalmú cementtel készült betonfelületek.

Nitrátok képződnek → műtrágya



Etemit Activa síkpadák levegőtisztítása

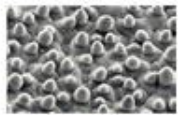


„TioCem” cementtel készült burkolat Pécsi, Kálvária-domb (2012)

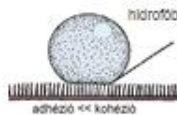
Öntisztuló mikro-strukturált festékfelületek

Lótusz- effektus elvén működő öntisztuló homlokzatvédelem

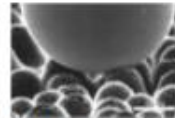
- A felületet nano- és mikroszkopikus **cella-kiemelkedések** alkotják.
- Fraktált felület hidrofób hatása: vízcseppek a felületi feszültség hatására gömbformát alkotnak, felületről legurulnak



Lótuszlevél struktúrája



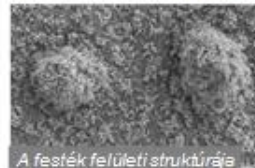
Vízcsepp a fraktált felületen



Szennyeződés eltávolítása

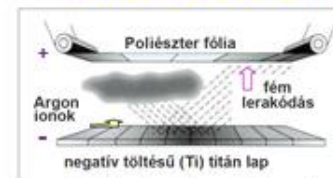
Sto Lotusan, CarboSol homlokzatfesték:

1. Kapcsolódó komponensek „**tapadó hid**”.
2. Szilikát **gyöngyök** Ø100 nm.
3. Vékony TiO₂ -ot tartalmazó **UV védőréteg**.
4. Fraktált felületet adó trimetoxi-fenil-szilán a felületről kiálló **nanorészecskékkel**.

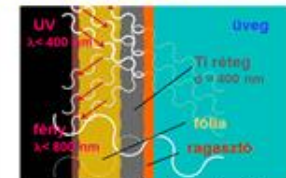


A festék felületi struktúrája

A napfény UV sugárzása ellen védő üvegfóliák



Katódpontosításos eljárással titán réteggel begyűzősítése a fóliába



Az UV sugárzás reflexiója a védőfólia titánrétegen

Az UV sugárzást szűrő üvegfólia felépítése:

- A Nap UV- A és B sugárzásának (λ < 400 nm) károsító hatása.
- Ti és Cu atomokat ágyaznak (Sputterezés) a fólia hordozóanyagba.
- A Ti (d = 200-400 nm) rétegen a látható fény (λ > 400 nm) áthatol.
- Szűrőhatás a **reflexió árnyékolási elvén** alapszik.
- Az UV hullámhossznak megfelelő tartomány reflektálódik „**fémkör csapdázódás**” a λ < 400 nm tartományban.
- Bruxsafo® sugárzásvédő üvegfóliák, UV sugárzás 99%-át kiszűrik.