

AR 2010/1

Arhitektura, Raziskave
Architecture, Research

Ljudmila Koprivec, Martina Zbašnik-Senegačnik

PAMETNA GRADIVA IN

NJIHOVE APLIKACIJE V ARHITEKTURI

SMART MATERIALS AND THEIR APPLICATION IN ARCHITECTURE



AR

Arhitektura, raziskave / *Architecture, Research*

Fakulteta za arhitekturo
Inštitut za arhitekturo in prostor

ISSN 1580-5573
ISSN 1581-6974 (internet)
<http://www.fa.uni-lj.si/ar/>

revija izhaja dvakrat letno / published twice a year

urednik / editor
Borut Juvanec

regionalna urednika / regional editors
Grigor Doytchinov, Avstrija
Lenko Pleština, Hrvaška

uredniški odbor / editorial board
prof dr Vladimir Brezar
prof dr Peter Fister
prof dr Borut Juvanec, urednik / editor
prof dr Igor Kalčič
doc dr Ljubo Lah

znanstveni svet / scientific council
prof dr Paul Oliver, Oxford
prof Christian Lasseur, Pariz
prof Enzo d'Angelo, Firence

recenzentski svet / supervising council
dr Kaliopa Dimitrovska Andrews
akademik dr Igor Grabec
dr Hasso Hohmann, Gradec
mag Peter Gabrijelčič, dekan FA

tehnični urednik / technical editor
dr Domen Zupančič

prelom / setting
VisArt studio, Barbara Kovačič

lektoriranje, slovenščina / proofreading, Slovenian
Karmen Sluga

prevodi, angleščina / translations, English
Milan Stepanovič, Studio PHI d.o.o.

klasifikacija / classification
Doris Dekleva-Smrekar
CTK UL

uredništvo AR / AR editing
Fakulteta za arhitekturo
Zoisova 12
1000 Ljubljana
Slovenija
urednistvo.ar@fa.uni-lj.si

naročanje / subscription
cena številke je 17,60 EUR / price per issue 17,60 EUR
za študente 10,60 EUR / student price 10,60 EUR

revija je vpisana v razvid medijev pri MK pod številko 50
revija je indeksirana: Cobiss, ICONDA

za vsebino člankov odgovarjajo avtorji / authors are responsible for their articles

revija sofinancirata / cofinanced
JAK, Javna agencija za knjigo RS
Ministrstvo za šolstvo in šport RS

tisk / printing
Tiskarna Pleško

© AR, Arhitektura raziskave, Architecture Research
Ljubljana 2010

izvleček

Pametna gradiva so nova generacija gradiv, ki bodo v prihodnosti revolucionarna spremenila sestav ovoja zgradbe in tudi njegovo delovanje. Nastajajo v številnih laboratorijih po vsem svetu in sicer v različnih branžah, trenutno manj ši del je že uporaben tudi v arhitekturnem in tehnološkem oblikovanju.

Pametna gradiva se odzivajo na dražljaje iz okolice na ta način, da bistveno spremenijo svoje lastnosti. Te reakcije na zunanje stimulacije so hitre, predvidljive oz. načrtovane in običajno reverzibilne. Spremembe na gradivih so različne - gradiva spreminjajo svoje lastnosti (npr. barvo, agregatno stanje, električno prevodnost, viskoznost, transparentnost itd.) ali energijo (oddajajo svetlobo, pretvarjajo sončno energijo v električno, električno v mehansko itd.).

V članku so predstavljene vrste pametnih gradiv in njihove aplikacije v arhitekturi.

abstract

Smart materials are new materials which will change the structure of building claddings and their operation in a revolutionary way. They are made in numerous laboratories around the world and in various areas; a smaller number of them are already applicable in architectural and technological design.

Smart materials are responsive to external stimuli in a manner which significantly changes their properties. These responses to external stimuli are fast, predictable and planned, and are usually reversible. The changes undergone by materials vary - materials change their properties (e.g. colour, physical state, electrical conductivity, viscosity, transparency etc.) or energy (emit light, convert solar energy into electrical energy, electrical energy into mechanical one etc.)

The article presents three kinds of smart material and their applications in architecture.

ključne besede

pametna gradiva, pametni sistemi, nanotehnologija

key words

smart materials, smart systems, nanotechnology

Znanost gradiv ni več to, kar je nekoč bila. Ko smo včasih govorili o gradivih, smo mislili na njihovo "zgradbo" - pasivni predmet, izrezan in oblikovan v uporaben element. Leseni tramovi, kamniti bloki, kovinske pločevine in traverze, plastične posode: to so bili konvencionalni predmeti, od katerih se je zahtevalo le to, da so bili, in ne, da bi kaj delali. Gradivo se je smelo spreminjati čim manj - torej ni smelo nabrekati, korodirati, se upogibati, vibrirati... Edini trud tehnične stroke je bil usmerjen v to, kako te elemente iz konvencionalnih gradiv sestaviti.

Sedaj se začenja na gradiva gledati drugače. Napredna gradiva, ki nastajajo v zadnji letih v znanstvenih ustanovah, so funkcionalna: od njih se zahteva, da nekaj delajo in naredijo neko določeno namensko spremembo. Igrajo aktivno vlogo pri tem, kako strukture ali naprave delujejo.

Prihaja torej do drastičnih sprememb v inženirski filozofiji. Od starih Grkov do 20. stol. smo gradili ali se trudili graditi naše zgradbe, da bi bile nedojemljive za spremembe v svojem okolju in da bi se monolitno zoperstavile vsemu, kar se je dogajalo okrog njih. 21. stol. je čas novih tehnologij, tudi v graditeljski sferi. Pristop h gradnji se spreminja: išče se načine, kako zgradbo narediti prilagodljivo, da se ne bi borila proti spremembam, ampak bi se nanje prilagodila.

Danes že imamo gradiva, ki to znajo narediti. Pametna gradiva imajo potencial, da bodo popolnoma spremenila dosedanje principe v tehniki, tehnologiji in oblikovanju [Smart materials]. Pametno gradivo lahko definiramo kot gradivo, katerega lastnosti ali oblika se spremenijo kot odgovor na spodbudo iz okolja. V

resnici so sicer vsa gradiva taka. Večina gradiv nabrekne, če so npr. izpostavljena vročini ali vlagi. Veliko truda je bilo vložena v to, da npr. pločevina ne bi termično nabrekala, da bi se lahko uporabljala tudi v občutljivih mehanizmih, kot so npr. ure. Kar gradivo naredi pametno je to, da take spremembe kot odgovor na dražljaj iz okolja nastanejo načrtovano. Praviloma lahko odgovorijo na neznatno spodbudo, ki bi druga gradiva pustila popolnoma nespremenjena. Magnituda njihovega odgovora je velika, npr. povečanje na stokratno volumen tudi pri zelo majhni temperaturni razliki.

Pametna gradiva so torej gradiva, ki so sposobna zaznavati spodbude (stimulacije) iz svojega okolja in nanje načrtovano reagirati na predvidljiv, uporaben, odgovoren, reproduktiven in običajno reverzibilen način. In to ne le enkrat, število odgovorov na spodbudo iz okolja je neomejeno.

Pametna gradiva izhajajo iz raziskav na mnogih področjih in se velikokrat prekrivajo tudi z nanotehnologijo. V raziskavah pametnih gradiv vodijo ZDA, večinoma zaradi raziskav v vojaški industriji. Sledi Velika Britanija, kjer so v ospredju raziskave pametnih sistemov, ki so sposobne samopopravila poškodb. Japonske raziskave so zelo obširne na področju elektronike, Nemčija vodi na področju biomimetike (znanost, ki posnema naravo), Francija pa je aktivna na področju raziskav za embalaranje. EU vlaga v raziskave na področju pametnih gradiv in sistemov v okviru 7. okvirnega programa [Smart materials and systems, 2008].

Lastnosti pametnih gradiv

Pri pametnih gradivih lahko izpostavimo njihove osnovne lastnosti [Addington, Schodek, 2005: 80-81]:

- **sprememba lastnosti** - gradiva zaradi vnosa energije (toplotne, svetlobne, električne itd.) spremenijo mikrostrukturo. V različni fazi pridobijo različne lastnosti kot npr. prevodnost, transparentnost, barvo, volumen itd.
- **sprememba energije** - gradiva lahko sprejeto energijo spremenijo v drugo obliko. Čeprav je učinkovitost pretvorbe energije (npr. pri fotovoltaičnih gradivih) manjša kot pri konvencionalnih gradivih, je potencialna korist te energije veliko večja.
- **reverzibilnost** - nekatera gradiva lahko menjavajo obliko vnesene in oddane energije. Lahko npr. proizvajajo električni tok pod določenim pritiskom ali pa se deformirajo pod električnim tokom [Material World 2, 2006: 265]

Spodbude iz okolja, na katera se pametno gradivo odzove, so v obliki različnih vrst energij - potencialne, električne, toplotne, mehanske, kemične in kinetične, ki se lahko izmenjujejo ali spreminjajo po prvem termodinamičnem zakonu fizike (zakon o ohranitvi energije). Delovanje pametnega gradiva pa lahko spodbudi tudi sprememba temperature, vlage, pH, magnetnega polja itd. Če spodbuda iz okolja vpliva na notranjo sestavo gradiva tako, da spremeni njegovo molekularno strukturo ali mikrostrukturo, potem je rezultat vnosa **spreminjanje lastnosti gradiva**. Če pa mehanizem spremeni energijsko stanje gradiva, ne spremeni pa samega gradiva, potem je rezultat zunanje spodbude **pretvorba energije iz ene oblike v drugo**. Oba mehanizma delujeta na molekularni ravni, torej v mikromerilu. Še več, pogosta zamenjava energije se zgodi na nivoju atoma, zato fizikalnega delovanja pametnih gradiv v merilu, v katerem se pojavijo (v molekuli ali atomu), ne moremo videti.

Za pametna gradiva je značilno, da so sposobna hitrega odziva na zunanje vplive, hkrati se lahko odzivajo na več kot eno stanje okolja, imajo notranjo inteligenco in so sposobna samopogona, njihov odziv na spodbudo iz okolja je v naprej določen in zelo neposreden.

Klasifikacija pametnih gradiv

Ker pametna gradiva niso statična, temveč se aktivno odzivajo na okolje, je najbolj smotrna večnivojska klasifikacija pametnih gradiv - en nivo označuje gradivo glede na njegovo fizikalno delovanje (*kaj gradivo naredi*), drug nivo pa označuje gradivo glede na njegovo fenomenološko delovanje (*rezultat fizikalnega delovanja*). Zato je smotrno kategoriziranje pametnih gradiv glede na njihovo reakcijo, ki je analogno arhitektovemu namenu: **kaj želimo, da gradivo naredi?** Pametna gradiva neposredno vplivajo na energijsko okolje (svetlobno, termično, akustično) ali pa posredno na sisteme (proizvodna energije). Tak pristop k uporabi in izbiri pametnih gradiv v oblikovanju okolja je predvsem koristen za oblikovalce in arhitekte.

Pametna gradiva sprejemajo energijo iz okolja in nanjo reagirajo na dva načina: vnesena energija lahko spremeni molekularno strukturo ali mikrostrukturo gradiva, s čimer se spremenijo tudi lastnosti gradiva (t.i. **gradiva, ki spreminjajo lastnosti**); če pa

vnesena energija spremeni energijsko stanje sestave gradiva, ob tem pa ne spremeni samega gradiva, je rezultat pretvorba energije (t.i. **gradiva, ki pretvarjajo energijo**) [Addington, Schodek, 2005: 3-4].

Gradiva, ki spreminjajo lastnosti

Gradivo absorbira energijo in se ob tem spremeni. Sprememba okolja, v katerem se gradivo nahaja (interni ali eksterni dražljaji), sproži kemijske, mehanske, električne, magnetne ali toplotne spremembe, ki so direktne in reverzibilne. Glede na odziv, ki jih povzročijo zunanji dražljaji, jih razvrščamo v naslednje skupine (Addington, Schodek, 2005: 83):

a) Gradiva, ki spreminjajo barvo

To so gradiva, ki pod določenim zunanjim dražljajem spremenijo barvo. Ko zunanje dražljaja ni več, se gradivu povrne prvotna barva. To je skupina pametnih gradiv, ki je brez dvoma zanimiva za arhitekte in oblikovalce. Glede na vrsto zunanjih dražljajev, ki povzročijo spremembo barve in stopnjo transparentnosti, lahko gradiva razdelimo na: [Addington, Schodek, 2005: 84-87]:

- **Fotokromna gradiva** - se spremenijo, ko so izpostavljena svetlobi
- **Termokromna gradiva** - se spremenijo ob temperaturni spremembi
- **Elektrokromna gradiva** - se spremenijo, ko so pod električno napetostjo
- **Mehanokromna gradiva** - se spremenijo pod določenim pritiskom
- **Kemokromna gradiva** - se spremenijo, ko so izpostavljena specifičnemu kemičnemu okolju



Slika 1: Stol je prekrit s termokromno barvo, zaradi katere se pojavi odtis, ki priča, kdaj in kje je človeško telo počivalo. Vir: <http://www.jmayerh.de/home.htm>, <14.4.2009>.

Figure 1: Chair impregnated with thermochromic colour which shows the impression of when and where a human body rested.

Splošno znan je fotokromni efekt na sončnih očalih, ki je v uporabi že več kot 20 let. V arhitekturi in oblikovanju uporaba fotokromnih gradiv ni bila pogosta, saj so bili problemi s počasno reakcijo in pridobljeno toploto. Eden izmed prvih projektov, kjer so arhitekti predlagali fotokromna gradiva v fasadnem ovoju, je natečajni projekt Muzeja moderne

umetnosti v Münchnu leta 1992 [Ritter, 2007: 78]. Danes je njihova uporaba v eksterierju pogostejša. Predvsem se v fasadnem ovoju uveljavljajo elektrokromna gradiva, ki pod vplivom dodanega električnega toka spreminjajo barvo ter stopnjo transparentnosti.

b) Gradiva s fazno preobrazbo

Gradiva s fazno preobrazbo (PCM - Phase Change Materials) omogočajo latentno shranjevanje energije. Izdelujejo jih kot mikrokapsule iz parafinskega voska v ovoju iz polimerov, ki shranijo toploto, ki jo sprejemajo zaradi faznega prehoda (preobrazba agregatnega stanja iz tekočega v trdno) [BASF, 2006]. Do faznega prehoda pride zaradi sprejemanja toplote iz okolice. Proces je reverzibilen, ko se temperatura v prostoru zniža, se latentni hranilnik toplote "izprazni" - vosek se ponovno strdi in pri tem odda toploto nazaj v okolico. Gradiva s fazno preobrazbo lahko podležejo neomejenemu številu obrnljivih procesov/ciklov, brez poslabšanja ali zmanjšanja učinkovitosti [Addington, Schodek, 2005: 89]. Gradiva s fazno preobrazbo so posebej zanimiva za uravnavanje toplotnega ugodja v zgradbi.

Dokler so gradiva s fazno preobrazbo dodana neprozornim gradivom, nimajo posebnega vpliva na oblikovanje. Kadar so del transparentnih gradiv, pa je njihovo delovanje vidno in zato vplivajo na zunanji videz fasadnega ovoja - spreminja se stopnja prosojnosti gradiva.



Slika 2: Gradivo s fazno preobrazbo je vgrajeno v zasteklitev fasade in pripomore k boljši energijski učinkovitosti stavbe in videzu fasade, ki glede na fazno stanje gradiva spreminja stopnjo prosojnosti [Ritter, 2007: 171].

Figure 2: Gradually transformable material is incorporated into the façade glazing enhancing the energy efficiency of the building as well as the appearance of the façade, which changes its transparency in relation to the gradation level of the material.

c) Prevodni polimeri in ostali pametni prevodniki

Polimeri sami po sebi niso prevodni, lahko pa to postanejo z različnimi dodatki [Addington, Schodek, 2005: 90-91]. Molekularna struktura polimerov se spremeni pod vplivom električnega toka, molekule se razvrstijo tako, da prosti elektroni prevzamejo vlogo električnega prevodnika (npr. polyaniline (PANI) in polypyrrole (PPy) polimeri). Stopnjo električne prevodnosti lahko spremenijo kemično okolje, svetloba (fotoprevodniki in fotorezistorji), temperatura (piroprevodniki) ali močno magnetno polje (magnetoprevodniki). Veliko omenjenih prevodnih gradiv uporabljajo kot senzorje [Addington, Schodek, 2005: 90].

S kombinacijo različnih tipov prevodnih polimerov je možno

ustvariti diode in druge produkte, kot npr. fleksibilne zaslone OLED, ki jih lahko pritrdimo na različne podlage (npr. na ukrivljene membrane).

d) Reološka gradiva

Izraz "reološko gradivo" izhaja iz karakteristike tekočih snovi, da spremenijo lastnosti, ko so izpostavljene električnemu ali magnetnemu polju. Pri elektroeoloških gradivih se viskoznost tekočine spreminja sorazmerno z jakostjo električnega toka, pri magnetoeoloških pa sorazmerno s prisotnostjo magnetnega polja [Ball, 1997:131]. Spremembe v viskoznosti so lahko zanimive. Tekočina se lahko spremeni v trdno stanje, ko se električno polje vključi oz. izključi. Kljub velikim možnostim uporabe na področju arhitekture in oblikovanja do tega še ni prišlo. Možna je uporaba na pohištvu, npr. nastavitvev trdote ležišč in sedežev; za stavbe na potresno izpostavljenih območjih itd. [Addington, Schodek, 2005: 91-92].



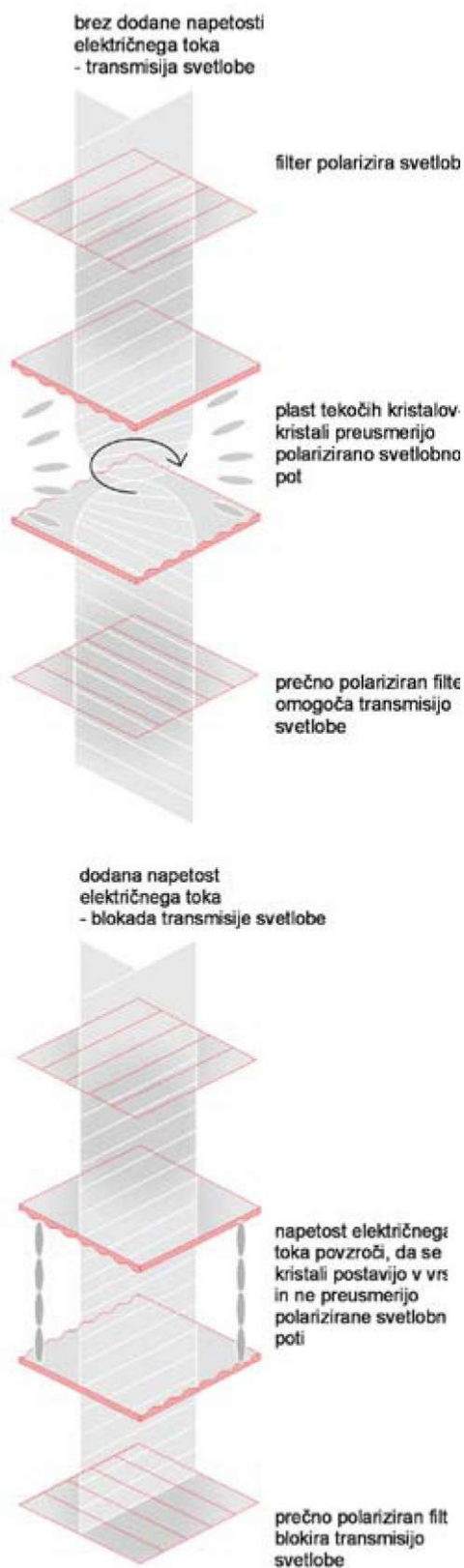
Slika 3: Reološka tekočina [http://www.designverb.com/wp-content/images/2006/07/magnetic_liquid.jpg, <dostop april, 2009>].

Figure 3: Rheological fluid.

e) Tekoči kristali

Tekoči kristali so vmesna faza med kristalnimi trdnimi snovmi in izotropnimi tekočinami. So izredno občutljivi na električna polja in primerni za optične prikazovalnike (slika 4) (optical displays). LCD (angl. liquid crystal display) uporablja dva sloja polariziranega gradiva, med katerima je raztopina tekočega kristala. Električni tok, ki potuje skozi gradivo, povzroči polarizacijo kristalov, zato svetloba ne more prodreti skozenj. Vsak kristal je kot zapiralo, ki dopušča prehod svetlobe ali pa njen prehod blokira [Addington, Schodek, 2005: 92].

Ker tekoče kristale primarno uporabljajo za velike LCD zaslone, je pozornost strokovnjakov že dalj časa usmerjena na možnost njihove uporabe na večjih zunanjih površinah (slika 5), kar je zanimivo za arhitekto in oblikovalce.



Slika 4: LCD uporablja dva sloja polariziranega gradiva, med katerima je raztopina tekočega kristala [grafika Koprivec, 2008].

Figure 4: LCD employs two layers of polarised material with a solution of liquid crystal between them.

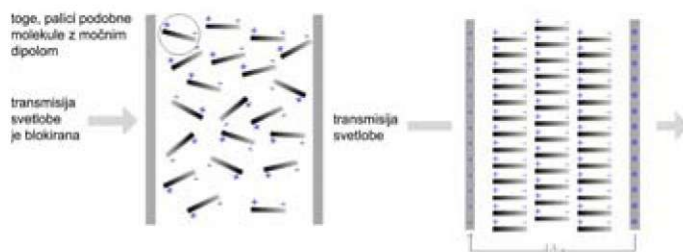


Slika 5: Vodnjak Crown Fountain v Millennium parku, Chicago [http://www.mediaarchitecture.org/2006, <dostop april, 2009>].

Figure 5: Crown Fountain in the Millennium Park, Chicago.

f) Delci, suspendirani v tekočini

Električno aktivirani prikazovalnik (slika 6) se spremeni iz neprozornega v prozorni zaslon in obratno. Tipični SPD (suspended particle device), zaslon z lebdečimi delci, sestoji iz več plasti različnih gradiv. Aktivna plast (delci, suspendirani v tekočini oz. prevleki) je vstavljena med dve paralelni, prevodni plasti. Brez električnega toka so delci v aktivnem sloju prosto razporejeni in absorbirajo svetlobo (površina zglada neprozorna, temna). Dovod električnega toka pa povzroči v polju usmerjeno strukturo delcev (razporeditev delcev v vrsto). Tako razporejeni povečujejo prehodnost svetlobe skozi kompozitno plast. Za vzdrževanje določene stopnje transparentnosti je potreben konstanten električni tok [Addington, Schodek, 2005: 94].



Slika 6: Prikazovalnik s suspendiranimi delci.

Figure 6: Display with suspended particles.

Gradiva, ki pretvarjajo energijo

Glavna lastnost teh gradiv je, da pod vplivom energijskih dražljajev gradivo ostane enako, pretvori pa se oblika energije. Pretvorba poteka direktno ali pa reverzibilno.

Elektrostriktivno gradivo transformira električno energijo v elastično (mehansko) energijo, končni rezultat je fizična sprememba oblike. Velikokrat je gradivo sestavljeno iz več drugih gradiv, vsako opravlja svojo določeno funkcijo. Ko je energijsko stanje gradiva enakovredno energijskemu stanju obdajajočega okolja, pravimo, da je gradivo v ravnovesju in

izmenjava energij ni možna. Če pa se gradivo nahaja v drugačnem energijskem stanju, potem je vzpostavljen potencial, ki vodi k izmenjavi energije. Veliko pametnih gradiv s sposobnostjo pretvarjanja energije je obojestransko usmerjenih - vnešana (input) energija in oddana (output) energija se lahko zamenjata. Pametna gradiva s sposobnostjo izmenjave energije so skoraj vedno kompoziti [Addington, Schodek, 2005: 95].

Razvijajo se različna gradiva, ki lahko spreminjajo energijo:

a) Gradiva, ki oddajajo svetlobo

Gradiva oddajajo svetlobo na različne načine - kot luminiscenco, fluorescenco in fosforescenco. Luminiscenca zajema različne pojave, ki temeljijo na oddajanju svetlobe. Če se emisija pojavi takoj, se uporablja termin fluorescenca. Če je emisija počasnejša ali zaostaja za nekaj mikrosekund ali milisekund, se uporablja termin fosforescenca. Gradiva so lahko naravno ali umetno fosforescentna.

Tipi luminiscence se razvrščajo glede na vrsto emisije, ki jo povzroča vnos energije, npr. fotoluminiscenca (povzroči jo svetlobna), kemična luminiscenca (povzroči jo kemični vpliv), elektroluminiscenca (povzroči jo vnos elektrike), bioluminiscenca (luminiscenca, prisotna v živalskih vrstah).

Vgrajena gradiva, ki oddajajo svetlobo, pridejo do izraza zlasti ponoči in s tem prispevajo k edinstveni nočni podobi okolja. Kot sestavne dele jih lahko dodajajo standardnim gradivom (slika 7).



Slika 7: Pot za pešce z dodanimi fosforescentnimi steklenimi delci in z drugimi luminiscentnimi sestavinami [Ritter, 2007: 121].

Figure 7: A footpath with incorporated phosphorescent glass particles and other luminescent components.

b) Sončne celice

Sončne celice neposredno pretvarjajo sončno energijo v električno. Podlaga za ta učinek je tehnologija polprevodnikov (snov, ki ima brez dovedene energije lastnosti električnega izolatorja, pri dovolj veliki dovedeni energiji pa ima lastnosti slabega električnega prevodnika [Amorfni polprevodniki]). Sončna energija sproži spremembo v celici, ki jo tvorita dve tanki plasti tipa P in N (dva osnovna tipa polprevodnikov). Med plastema se pojavi napetost - generator napetosti, ki sončno svetlobo spremeni v električno energijo [Addington, Schodek, 2005: 101]. Sončne celice so lahko prosojne ali neprosojne, na voljo so v različnih barvah, največkrat v temnomodri. Sončne

celice vgrajujejo na fasade (kot oblogo, sončno zaščito) in na strehe (tudi kot kritino) (slika 8).



Slika 8: Sončni moduli na fasadnem ovoju objekta [foto: Zbašnik-Senegačnik, 2006].

Figure 8: Solar modules on the façade cladding of a structure.

c) LED diode

LED diode (light emitting diodes) so polprevodniki, ki zasvetijo, ko skozi steče električni tok. Njihovo delovanje je torej nasprotno delovanju sončne celice [Addington, Schodek, 2005: 102].

LED diode spadajo v kategorijo najbolj inovativnih pametnih tehnologij. Svetlobna telesa LED niso žarnice, temveč čipi, ki emitirajo svetlobo, ko skozi steče električni tok. Barva svetlobe je odvisna od gradiva, ki je uporabljen v čipu. Polprevodniki ponavadi oddajajo rdečo, rumeno ali zeleno svetlobo. Polprevodniku iz galijevega nitrida, ki oddaja modro svetlobo, dodajajo indij in fosfor, tako preko zelene in rumene barve nastane bela svetloba [Sever, 2008: 7].

Diode porabijo le malo električne energije in so zelo trajne (življenjska doba LED diod je 11 let), dobro prenašajo vibracije, ne oddajajo UV ali IR sevanja, možna je uporaba v različnih izdelkih. Razsvetljava z LED diodami je energijsko varčna, saj se ne segrevajo kot običajne žarnice na žarilno nitko. Z vpeljavo LED diod na širše področje uporabe bi se po napovedih strokovnjakov poraba energije v industrijskih državah lahko znižala celo za eno tretjino [Sever, 2008: 8]. V Evropi bodo do leta 2020 navadne žarnice postopoma izginile iz prodaje. Trenutna pomanjkljivost LED diod je slab izkoristek, saj ena sama bela svetleča dioda zaenkrat ne oddaja zadovoljive količine svetlobe. Nekoč namenjene za uporabo v elektroniki, se LED diode hitro prebijajo na področje osvetljevanja v arhitekturi. Eden izmed inovativnih primerov je trenutno največji LED zaslon na svetu v kombinaciji s prvikat integriranim sistemom sončnih modulov v visečo fasado (slika 9).

Uporaba LED diod vpliva na optimizacijo svetlobnih sistemov v stavbnem sistemu. LED diode uporabljajo za osvetlitev fasad, za osvetlitev zunanjega prostora, za velike panelne zaslone. Spektralne lastnosti svetlobe je mogoče v nasprotju s konvencionalno osvetlitvijo natančno kontrolirati. Eden izmed takih primerov je Galleria Shopping Mall (slika 10).



Slika 9: Medijska fasada - sončne celice podnevi pretvarjajo energijo iz sončne v električno, ki jo ponoči s pomočjo LED zaslon uporablja za osvetlitev [http://www.greenpix.org/ <9.3.2009>].

Figure 9: Media façade - during the day, solar cells convert sunlight into electricity, which at night illuminates a LED display.

Fasada ne predstavlja "projekcijskega platna" v konvencionalnem smislu medijskih fasad, saj se ponoči s pomočjo digitalnega računalniškega nadzora odziva glede na zunanje vplive na gradivo podnevi. Tako po celotni fasadi nastajajo različne barvne in svetlobne kombinacije. Dnevni posnetki stanja vremena in procesiranje transformiranih podatkov na steklene diske z uporabo računalnikov so le ena izmed sposobnosti tega fasadnega ovoja.



Slika 10: Galleria Shopping Mall, Seoul; 2004. [http://www.interactivearchitecture.org/2007/ma7.jpg, <19.3.2009>].

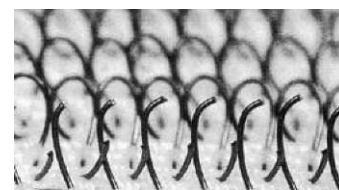
Figure 10: Galleria Shopping Mall, Seoul; 2004.

č) Piezoelektrična gradiva

Piezoelektrična gradiva spreminjajo električno energijo v mehansko in obratno [Addington, Schodek, 2005: 104]. Piezoelektrične lastnosti gradiva se lahko z dodajanjem primerne električne polja uporabijo za generiranje gibanja, sile, pritiska. Za arhitekto so predvsem zanimivi piezoelektrični keramični izdelki in piezoelektrični polimeri, ki jih uporabljajo v tehnologiji izdelave senzorjev in aktuatorjev (npr. gibanje ljudi ali obtežba vetra na stavbo lahko z uporabo piezoelektričnih gradiv proizvede električni tok) [Ritter, 2007: 154].

d) Zlitine s spominom

Zlitine s spominom imajo sposobnost, da po termomehanski obdelavi prevzamejo prvotno obliko. Pojav, ki se imenuje "shape memory effect", se nanaša na ponavljajočo se fazno spremembo med dvema kristalnima strukturama. Izdelujejo se lahko v obliki žic (slika 11), palic, cevi, vrvi, trakov [Ritter, 2007: 59]. Poleg zlitin poznamo tudi polimere in keramike z oblikovnim spominom. Zanimiva karakteristika nekaterih zlitin s spominom je, da so se zmožne priučiti novih oblik.



Slika 11: Zanke iz zlitine niklja in titana so v običajnem stanju zaprte, po toplotni obdelavi pa se odprejo [Ritter, 2007:62].

Figure 11: Loops from nickel-titanium alloys are closed in the normal state - after thermal treatment, they open up.

Aplikacije pametnih gradiv

Pametna gradiva sestavljajo naprave, naprave komponente, komponente gradnike, gradniki sisteme, ki bi bili lahko primerni za opravljanje bolj zahtevnih funkcij. Fasadni ovoj mora npr. ustrezati več dejavnikom hkrati, česar eno samo **pametno gradivo** ne zmore vedno zadovoljivo izvršiti.

Z združevanjem pametnih gradiv v senzorje in mikroprocesorje dobimo pametne sisteme, ki svoje lastnosti prilagajajo okolju, v katerem se nahajajo. Kot odgovor na spremembo v okolju gradivo kreira signal in ga prenese na mikroprocesor. Ta nadalje sproži ustrezno reakcijo gradiva, ki je vnaprej programirana in prilagojena določenim robnim pogojem okolice, v kateri se to gradivo nahaja. Kot primerjavo lahko podamo mehanizem očesa, kjer se zenica samodejno prilagodi intenzivnosti svetlobe, ki jo prejema [Ball, 1997].

Sestavni deli pametnih sistemov so senzorji, detektorji, pretvorniki, aktuatorji in nadzorni sistemi. Vsak od teh delov ima v pametnih sistemih svojo funkcijo [Addington, Schodek, 2005: 114-126]:

- **Senzor** - naprava, ki zazna fizikalne ali kemijske dražljaje (gibanje, toploto, kemično koncentracijo) in se nanje odzove z izmenjevanjem energije. V praksi je senzor element, ki na izhodu sproži signal, ta pa enolično ustreza vrednosti opazovane veličine na vhodu senzorja. Signal lahko uporabimo kot osnovo za merjenje ali kontrolo. Po osnovni definiciji se senzorji razlikujejo glede na obliko prejete energije: svetlobni senzor, zvočni senzor, toplotni senzor, senzor vlage, senzor dotika, senzor neposredne bližine, senzor gibanja, kemični senzor, magnetni senzor, okoljski senzor, biosenzor itd.
- **Detektor** - skupina senzorjev z ustrezno elektroniko; detektor spremeni osnovni signal, ki ga pridobi iz senzorja, v uporabno obliko.

- **Pretvornik** - senzor in pretvornik sta si podobna v delovanju, saj oba pretvarjata energijo. Pretvornik večinoma pretvarja energijo iz ene oblike v drugo (npr. iz kemične v električno energijo). Pretvorniki se uporabljajo za prenos, nadzor ali kontrolo energijskih tokov, medtem ko se senzorji odzivajo direktno na zunanji dražljaj.
- **Aktuator** (vzbujevalnik) - element, ki signal v obliki vhodne energije pretvarja v mehanski ali kemični signal. Termin se nanaša na napravo, ki premika ali kontrolira. Aktuator najpogosteje izvaja mehansko delo ali gibanje kot odgovor na vhodno električno napetost.
- **Nadzorni sistemi** - za delovanje pametnega sistema so potrebni različni nadzorni modeli, predvsem klasični mehatronski modeli, pa tudi modeli, ki vsebujejo pametna gradiva kot senzorje in aktuatorje. Zaradi njih lahko pametna gradiva opravljajo več funkcij hkrati. Tako lahko isto gradivo deluje kot senzor in/ali kot pretvornik. Veliko senzorjev se lahko uporabi tako, da delujejo hkrati kot aktuatorji. Pri aktuatorju zunanji dražljaj v obliki vhodnega signala (napetosti) sproži delovanje, pri senzorju zunanji dražljaj (mehanska deformacija) proizvaja izhodni signal (napetost), ki se nadalje lahko uporablja za nadzorovanje [Addington, Schodek, 2005: 127 - 130].

Pametni fasadni sistemi

Realnost tradicionalnega fasadnega ovoja je v tem, da deluje kot razmejitev med dvema različnima okoljema - med zunaj in znotraj. To realnost bi lahko zamenjala ideja, da je fasadni ovoj "okolje mnogih energij", okolje, ki je fluidno in vzajemno s fluidnimi pogoji zunaj in znotraj. Takšen fasadni ovoj bi se prilagajal delovanju teles uporabnikov in zunanjim spremembam. Pametna gradiva bi s svojimi lastnostmi kot so prehodnost, minljivost in sposobnost odziva na energijski dražljaj lahko omogočila takšno sestavo fasadnega ovoja.

Glavna ovira, ki omejuje naše razmišljanje o gradivih, je sprejeto prepričanje, da prostorski ovoj deluje kot meja. Prostor si predstavljamo kot ambient zraka in svetlobe, ki je omejen s svojimi površinami. Predpostavka, da so fizikalni in prostorski mejniki eno in isto, vodi k osredotočanju na enotne, multifunkcionalne sisteme fasadnega ovoja [Addington, Schodek, 2005: 6].

Trenutno je realizacija fasadnega ovoja, ki bi se prilagajal delovanju teles uporabnikov in zunanjim spremembam še daleč od realnosti, vendar nas že takšno razmišljanje napelje k dožemanju arhitekture na nov način. V realnosti je trenutno najbolj opazna kategorija uporabe pametnih gradiv v arhitekturi na področju oken in fasadnih sistemov [Addington, Schodek, 2005: 163].

• Pametna okna

Termin "pametno okno" se nanaša na vsak sistem, ki kaže na interaktivno ali zamenljivo površino, ne glede na to, ali je površina prava ali virtualna, notranja ali zunanja. Pametna okna opravljajo eno ali več naslednjih funkcij [Addington, Schodek, 2005: 166]: uravnavajo svetlobne in/ali toplotne prepustnosti, toplotne absorpcije, vizure. Električno aktivirana zasteklitev kljub pomanjkljivosti ostaja najbolj pomembno področje aplikacije pametnih gradiv v objektih. Pomembno pa je razlikovati med

električno aktiviranimi gradivi in med tistimi, ki jih aktivira okolje [Addington, Schodek, 2005: 168].

• Pametna fasada

Fasada bo imela v prihodnosti več funkcij hkrati [Knaack, 2007: 130]: zaznavala bo dražljaje iz okolice (percepcija), izbirala primerne odgovore glede na določene omejitve in prioritete (sklepanje) ter s svojim delovanjem realizirala odgovore. Pametna fasada prihodnosti bo lahko kontrolirala transmisijo sončnega sevanja skozi fasadni ovoj z uporabo fotokromnih gradiv, elektrokromnih gradiv, panelov iz suspendiranih delcev ter panelov iz tekočih kristalov, panelov s svetlobnimi senzorji ter z uporabo aktuatorjev (npr. zlitin s spominom, elektrostriktivnimi in magnetostriktivnimi gradivi). Z uporabo termotropnih gradiv in gradiv s fazno preobrazbo bo možno kontrolirati prehod toplote skozi fasadni ovoj. Čeprav se zdi, da se aplikacije pametnih gradiv v fasadnem ovoju osredotočajo le na njihov tehnološki učinek, bodo neizbežno vplivale na popolnoma novo oblikovanje. Možnosti v sodobnem oblikovanju fasadnega ovoja vključujejo fasade, ki spreminjajo barve, stopnjo transparentnosti in so lahko dinamične, lažje in tanjše; fasade, ki so izolativne in hkrati prozorne [Borch, 2004: 478].

Primeri pametnih fasad [Koprivec, 2009]

SmartWrap, Philadelphia, 2003 (arh. Kieran Timberlake Associates)



Slika 12: Paviljon Smart Wrap [Ritter, 2007:140].

Figure 12: Smart Wrap Pavilion.

Paviljon SmartWrap je eksperiment, ki kaže na možno uporabo pametnih gradiv v fasadnem ovoju. Postavljen je bil leta 2003 v Cooper Hewitt National Design Museum in predstavlja inovativni, polivalentni stavbni ovoj. SmartWrap sestoji iz dveh slojev. Notranji sloj vključuje toplotno izolativna gradiva - aerogel in gradiva s fazno preobrazbo. Zunanji sloj sestoji iz transparentnega PET (polyethylene terephthalate) gradiva, na katerega so s postopkom tiskanja ali valjanja nanosena različna pametna gradiva: organske sončne celice, tanke prevleke - baterije za shranjevanje električne energije, prevodne, organske, tanke prevleke - tranzistorji (OTFT) za distribuiranje elektrike in izvršitev kontrolnih funkcij, OLED (na polimerni bazi) za osvetljevanje in elektronski prikazovalnik, kromatična sončna zaščita za kontroliranje transmisije svetlobe in toplote.

Agbar Tower, Barcelona, 2005 (arh. Jean Nouvel)

računalniškimi uravnavanjem 700 000 LED diod. Uravnavajo jih trije glavni računalniki in 65000 mikroročunalnikov. Ti so zmožni procesirati dvaintrideset trilijonov ukazov na sekundo, zato se lahko predvajajo prezentacije slik in tudi filmov [Ritter, 2007: 96].



Slika 14: Chanel Ginza [Ritter, 2007: 97].

Figure 14: Chanel Ginza.

Na fasadi nebotičnika Agbar Tower je nekaj sto palic z LED svetili v štirih osnovnih barvah. Z variacijo intenzivnosti diod in uporabo enostavnega računalniškega programa je ustvarjena barvita fasada stolpa. LED sistem je vstavljen med zunanjo in notranjo plastjo fasadne opne in ima življenjsko dobo 100.000 ur ter nizko porabo energije.

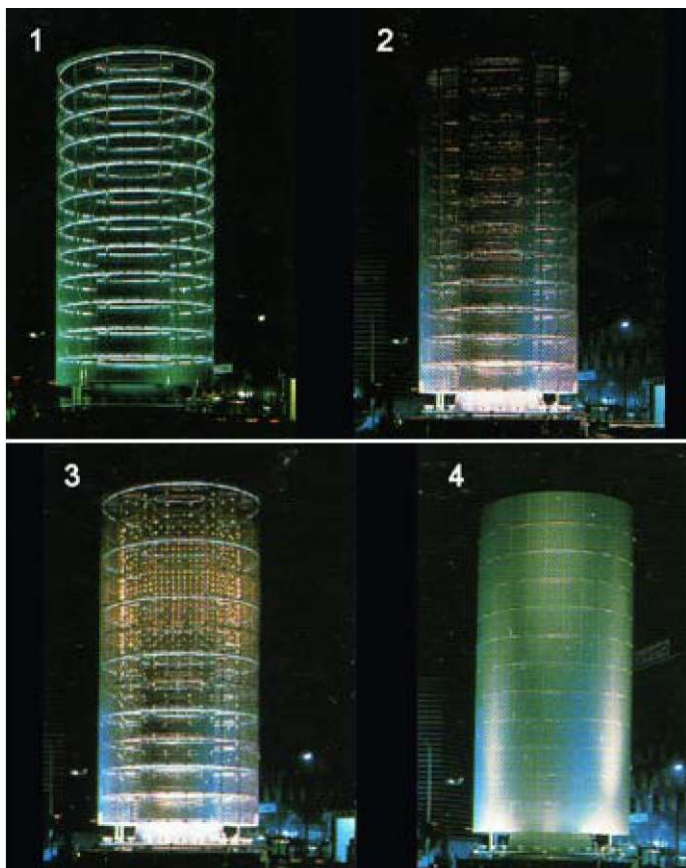
Chanel Ginza, Tokyo, 2004 (arh. Peter Marino Associates)

Zgradba ima cca 910 m² viseče steklene fasade. Staklo sive barve je vpeto med jekleno romboidno konstrukcijo. Za konstrukcijo je prazen prostor, sledi elektro-optična plast (laminirano staklo sestoji iz dveh slojev izredno čistega stakla in prevleke iz tekočih kristalov) ter steklene plošče, ki jih v horizontalni smeri prekinjajo aluminijaste prečke z vgrajenimi LED diodami.

Fasada je podnevi prozorna, ponoči pa se spremeni v neprozorno površino s funkcijo oglaševalskega panoja. To je možno z

Tower of Winds, Yokohama, 1986 (arh. Toyo Ito)

Stolp the Tower of Winds zazna oziroma posname veter in zvok - dejanske dogodke na ulici - in jih kot odgovor nemudoma grafično prikazuje na fasadi [Ritter, 2007]. Enaindvajset metrov visok stolp je del trgovskega kompleksa v Yokohami. Ovalni aluminijasti cilindri obdajajo sintetični zrcalni paneli, med njimi so nameščena svetlobna telesa (1280 majhnih lučk in 12 belih, vertikalno razporejenih neonskih obročev), kontrolirana s 30 računalniškimi programi, ki podnevi ustvarjajo različne vzorce v notranjosti stolpa. Ponoči se svetlobna telesa v stolpu odzivajo s spremembo v intenzivnosti in sicer glede na hitrost vetra, del dneva, letni čas in zvoke okolja.



Slika 15: Stolpi vetrov [Ito, 1995].

Figure 15: Tower of Winds.

Alianz Arena, München, 2001 (arh. Herzog & de Meuron)

Zunanji ovoj ima približno 65.000 m² površine. Sestavljajo ga romboidno oblikovani elementi. Membrana iz ETFE folije z debelino 0,2 mm je pripeta na aluminijaste profile, ki so pritrjeni na jekleno nosilno konstrukcijo. Ustrezno obliko membrane vzdržujejo pnevmatsko. Ventilatorji dovajajo zrak pod tlakom 300 Pa (lahko se zviša največ do 800 Pa, da lahko membrana vzdrži obtežbo snega ali dežja) [Zettlitzer, 2005]. V fasadni plašč so nameščene barvne LED diode, ki spreminjajo barve (od bele do rdeče in modre) glede na nogometni klub, ki igra v stadionu. Čez dan fasada objekta deluje svetlikajoče, prozorno [Schittich, 2006:114].



Slika 16: Allianz Arena [foto: Koprivec, 2007].

Figure 16: Allianz Arena.

Diskusija

Vodilni ekspert na področju uvajanja pametnih gradiv v arhitekturo, arhitekt Axel Ritter, pravi (<http://www.dexigner.com/jump/news/18635>), da bo uporaba gradiv, ki spreminjajo svoje lastnosti kot odgovor na vročino, vlago, svetlobo in druge vrste energije, drastično spremenila arhitekturo. Zgradbe prihodnosti bodo sposobne spreminjati barvo, velikost, obliko in prozornost pod vplivom spodbude iz okolja. Napoveduje, da bodo arhitekti, ki bodo prenehali tekrovati s trendi, ki jih prinašajo pametna gradiva, ostali zadaj. V arhitekturni sferi je namreč za pametna gradiva zelo veliko možnosti. Nekateri njihovi potenciali so se že izkazali v praksi, drugi so v idejni fazi, večina pa še čaka na izzive arhitektov.

Dosedanja uporaba pametnih gradiv in sistemov je svoje izzive v arhitekturi iskala predvsem v vizualnih učinkih - zlasti s spreminjanjem barv in drugih svetlobnih učinkov. Znanstveniki pa se trudijo, da bi pametna gradiva izrazila predvsem svoj tehnični in funkcionalni potencial. Obstaja več možnosti uporabe pametnih gradiv. Na primer v aktivnem sistemu, ki lahko zaznava in odgovori na vibracije zemlje. Sistem dušenja vibracij za zgradbe so že raziskovali na Japonskem. Nebotičnik Dowa Kasai Phoenix Tower v Osaki ima sistem reduciranja vibracij, ki zmanjšuje tudi zibanje zaradi vetra, ki je občasno v Osaki lahko zelo močan. Brez sistema te vrste bi uporabniki zgradbe lahko dobili občutek morske boleznii v času močnega vetra. Zgradba uporablja sistem kontrole vibriranja imenovan DUOX, ki je sposoben hitro dušiti oscilacije. Te dosežejo v zgornjem nadstropju amplitudo kar nekaj centimetrov. Mostovi, npr., bi lahko bili opremljeni s pametnimi sistemi, ki bi naznanili alarm, ko bi vibracije zaradi prometa ali guganja vetra postale prevelike, in sicer z aktiviranjem dušilnikov, ki bi pomike nevtralizirali [Smart materials].

Slika 17: Stolp Dowa Kasai Phoenix, Osaka [<http://www.emporis.com/application/?nav=image&id=175784>, dostop februar, 2010].

Figure 17: Dowa Kasai Phoenix Tower, Osaka.

Veliko možnosti je tudi pri prihrankih energije. Zgradbe so veliki indirektni sistemi, ki omogočajo homogene pogoje bivanja v stavb. Če bi lahko začeli razmišljati v manjšem merilu - kaj potrebuje telo - in ne v večjem merilu - kaj potrebuje stavbni prostor - bi lahko dramatično reducirali porabo energije in investicijo v gradiva, tako da bi omogočili boljše pogoje za uporabnike. Prihod pametnih gradiv sedaj obljublja oblikovanje direktnega in diskretnega okolja za človeško telo.

Že danes večina pametnih gradiv jemlje energijo in snovi neposredno iz okolice. Tako lahko v prihodnjih letih pričakujemo, da se bomo soočili z avtomatsko uravnanimi gradbenimi sistemi, ki ne bodo nujno jemali elektrike iz javnega omrežja, ampak bodo izkoriščali sončno energijo [Green smart materials].

Pametni sistemi se bodo sposobni sami razstaviti. Že danes obstajajo take uspešne raziskave v elektronski industriji. Ročno razstavljanje naprav je časovno zamudno in drago, raba pametnih gradiv bi pomagala tak proces avtomatizirati. Angleško podjetje Active Disassembly Research Ltd. [Smart materials and systems] je izdelalo posebne zaponke iz zlitine s spominom, ki lahko pri segrevanju same popustijo. Ko zaponke popustijo, se komponente posamezne naprave enostavno ločijo s stresanjem izdelka. Z uporabo zaponk, ki reagirajo na različne temperature, se izdelki lahko razstavijo hierarhično, tako da se tudi gradiva ločujejo avtomatično. Podjetje sodeluje s podjetjem Nokia in verjame, da bo ta tehnologija v uporabi v naslednjih dveh letih. Zgradbe, ki odslužijo svojemu namenu, so danes problematične ravno zaradi tega, ker je gradiva posameznih komponent nemogoče ločiti.

Današnje zgradbe, mostovi, cevovodi, ladje in letala morajo biti oblikovani zelo robustno. Redno jih je treba pregledovati, da se prepreči poškodbe, ki imajo lahko tudi katastrofalne posledice. Pregled je drag in vzame veliko časa. Raziskovalci na inštitutih delajo na sistemih, ki lahko diagnosticirajo in popravijo te vrste poškodb avtomatično. Znotraj gradbenih elementov je vstavljen senzor, ki kontrolira pritisk in poškodbe in lahko zmanjša stroške vzdrževanja ter podaljša življenjsko dobo. Sistem je vključen že v približno 40 mostov na svetu. Razvijajo tudi gradiva, ki bodo sposobna poškodbe, do katerih bo prišlo, sama popraviti. Ena izmed metod v razvoju so tanke cevke, v katerih je smola, vgrajene v gradivo. Ko pride do poškodbe, te cevke počijo, iz njih se razlije smola, ki zapolni poškodovana mesta. Samopopravilo bi lahko bilo pomembno na nedostopnih mestih, npr. pod vodo [Smart materials].

Tehnološke inovacije, do katerih prihaja po vsem svetu, že napovedujejo drastične spremembe na zgradbah prihodnosti. Pametna gradiva in sistemi kažejo velike potenciale tako na oblikovalskem kot na funkcionalnem področju. Arhitekti so pred velikim izzivom, da jim določijo namembnost, jih razvijejo do konca in vključijo v projekte. Ali pa se bo zopet ponovila zgodovina, ko vizionarji, ki so ustvarili mnoge predčasne arhitekturne stvaritve, med njimi Kristalno palačo in Eifflov stolp, niso bili arhitekti?

Viri in literatura

- Addington, M., Schodek, D. (2005): Smart Materials and Technologies for architecture and design professions. Elsevier Ltd., Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo.
- Amorfni polprevodniki, <http://www-fl.ijs.si/~ziherl/amorfnipolprevodniki.pdf>, <dostop februar, 2010>.
- Ball, P. (1997): Made to measure, new materials for the 21st century. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Borch, I. (2004): Skins for buildings: the architect's material sample book. BIS Publishers, Amsterdam.
- Green smart materials, <http://www.bpn.com.au/article/Green-smart-materials/501070.aspx>, <dostop februar, 2010>.
- Ito, T. (1995): Toyo Ito, Academy Editions, London.
- Knaack, U. et al, (2007): Façades, Principles of Construction. Birkhäuser AG, Basel, Boston, Berlin.
- Koprivec, L. (2009): Vpliv sodobnih gradiv in tehnologij na oblikovanje fasadnega ovoja. Doktorska disertacija. UL Fakulteta za arhitekturo, Ljubljana.
- Micronal PMC, (2006): Intelligentes Temperaturmanagement für Gebäude. BASF, Ludwigshafen.
- Ritter, A. (2007): Smart materials in architecture, interior architecture and design. Birkhäuser-Publishers for Architecture, Basel, Berlin, Boston.
- Schittich, C. (2006): In detail: building skins: concepts, layers, materials. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- Schwartz, M. (2002): Encyclopedia of Smart Materials. Vol.2, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Sever, 2008: Svet znanosti in tehnike. V: Življenje in tehnika, št. 3, Tehniška založba Slovenija, Ljubljana.
- Smart materials, http://www.agrfoto.com/philipball/docs/pdf/Oxford_smart_materials.pdf, <dostop februar, 2010>.
- Smart materials and systems (2008), <http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn299.pdf>, <dostop februar, 2010>.
- Smart materials will "revolutionise" architecture within years, <http://www.architectureanddesign.com.au/article/Smart-materials-will-revolutionise-architecture-within-years-expert/497288.aspx>, <dostop, februar 2010>.
- Zettlitzer, W. (2005): Planung, Fertigung und Montage der Kissenhülle, V: Detail - Zeitschrift für Architektur + Baudetail, n. 9, v. 45, München.

dr. Ljudmila Koprivec
ljudmila.koprivec@trimo.si
TRIMO d.d.
Sektor razvoja in informatike

prof. dr. Martina Zbašnik-Senegačnik
martina.zbasnik@fa.uni-lj.si
UL Fakulteta za arhitekturo

h m l i T i n l i
h m h 1 i n i n

Fakulteta za arhitekturo
Inštitut za arhitekturo in prostor
Ljubljana 2010

