

BIOMIMETIKA V ARHITEKTURI PRIHODNOSTI BIOMIMETICS IN THE ARCHITECTURE OF TOMORROW

UDK 72.01:573.6
COBISS 1.01 izvirni znanstveni članek
prejeto 09.2.2009

izvleček

Biološki sistemi, ki so se razvijali skozi milijone let evolucije na Zemlji in omogočali organizmom, da se oblikujejo, prilagajajo in preživijo, imajo visoko optimirane lastnosti, ki jih danes zahteva sodobni, trajnostni razvoj naše družbe: so energijsko varčni, v ravnotežju z okoljem in morfološko učinkoviti. Podrobno opazovanje naravnih procesov in njihovih lastnosti je sprožilo zanimanje za novo vejo v raziskovanju, ki združuje tako naravoslovne znanosti kot tehnologije XXI. stoletja in zastavlja nove, kontrolirane pristope k oblikovanju prihodnosti: biomimetiko.

Biomimetika se danes uveljavlja na vseh področjih – tudi na področju arhitekture in gradbeništva. Biološki vzori so lahko model za imitacijo, kopiranje in učenje ali inspiracija za nove tehnologije. S pomočjo proučevanja bioloških vzorov nastajajo v arhitekturi nove oblike in vzorci ter gradiva. Biomimetična nano gradiva, biomimetične tehnične tekstilije ter biomimetična samozdravilna gradiva s svojimi lastnostmi močno presegajo konvencionalna gradiva in bodo osnova za izzive v arhitekturi prihodnosti.

ključne besede

biomimetika, bionika, nano gradiva, tehnične tekstilije, samozdravilna gradiva

abstract

Biological systems which have evolved on Earth over millions of years and made it possible for organisms to take their shapes, adapt and survive, possess the highly optimised characteristics required today for the contemporary, sustainable development of our society: they are energy-efficient, in balance with the environment and morphologically effective. Detailed observation of natural processes and their properties has triggered an interest in new directions in research, associating natural sciences as well as 21st century technologies, which opens up new, controlled approaches to the shaping of the future: biomimetics.

Today, biomimetics finds applications in all areas, including architecture and building. Biological models may be emulated, copied, learnt or taken as starting points for new technologies. Through studies of biological models new forms, patterns and building materials arise in architecture. Because of their properties, biomimetic nanomaterials, biomimetic technical textiles and biomimetic self-curing materials usually outperform conventional materials and constitute future challenges for architecture.

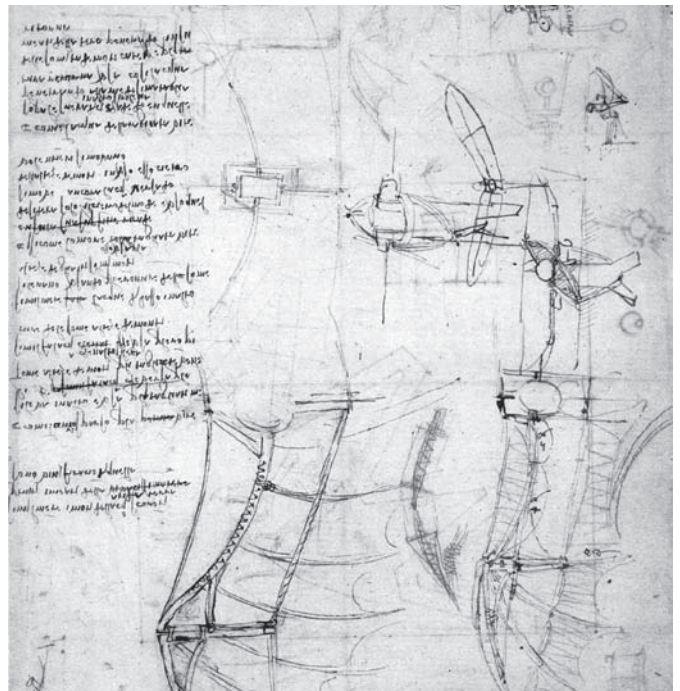
key words:

biomimetics, bionics, nanomaterials, technical textiles, self-curing materials

Biomimetika (bionika ali biomimikrimija) je biološka veda, ki proučuje zakone, na katerih temeljijo molekularna strukture, ki obstajajo v naravi in s tem rešuje probleme tehnike [Uradni list EU]. Izraz biomimetika je za inženirske znanosti leta 1969 skoval Otto Schmitt (gr. bios – življenje, gr. mimesis – posnemati naravo). Sicer uradni začetki posnemanja narave za potrebe tehničnega razvoja segajo v sredino prejšnjega stoletja. Biomimetika se je sprva kot potreba pojavila v vojaški in vesoljski tehniki, kasneje pa se je razširila tudi na druga področja: nevrokirurgijo, biokemijo, biofiziko, tudi v arhitekturo in gradbeništvo [Heynert, 1972: 25].

Zametki biomimetike

Neuradnih pradedov biomimetike je bilo v zgodovini kar nekaj – prvi znani bi bil lahko Dedalus, ki je z voskom zlepil krila iz ptičjih peres in poletel. Bolj znanstveno se je proučevanja organizmov lotil Leonardo da Vinci, ki ni bil nadarjen le za umetnost, temveč je imel tudi raziskovalno žilico. Obširni opus (približno 5000) risb kaže na njegovo mnogostranskost: fizika, mehanika, optika, geometrija, geologija pa tudi anatomija, botanika, zoologija. Analiziral je ptičji let, svoja spoznanja pa je prenesel na svoj letalni stroj (slika 1).



Slika 1: Leonardo da Vinci, studija ptičjih kril [vir: <http://lrh10.fh-bielefeld.de/Projekte/Leonardo/ing/flug.jpg>].

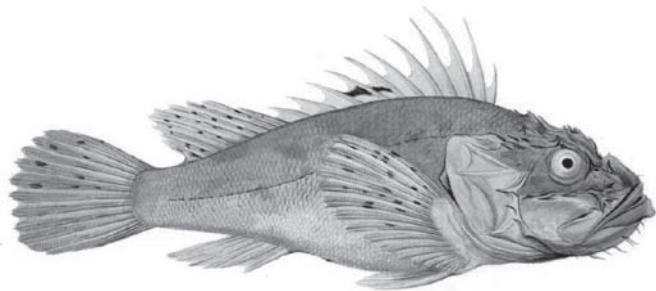
Figure 1: Leonardo da Vinci, study of bird wings [source: <http://lrh10.fh-bielefeld.de/Projekte/Leonardo/ing/flug.jpg>].

Kljub temu, da je Leonardo da Vinci razvijal svoje izume s preučevanjem živih bitij, ne velja za uradnega začetnika biomimetike. Zametki te vede segajo šele v začetek 18. stol., ko so se pojavile prve natančne grafične predstavitve živih organizmov. Začuda se tovrstno raziskovanje ni pričelo na domačih živalih, temveč na zelo oddaljenih, eksotičnih organizmih, kar so podpirali predstavniki tedanjih kolonialnih oblasti. V daljne dežele so med člane svojih ekspedicij uvrstili tudi slikarje, ki so evidentirali živa bitja na osvojenih področjih (sliki 2 in 3).



Slika 2: Insekti s Sumatre, kot jih je leta 1699 predstavila frankfurtska slikarka Maria Sybilla Merian [vir: Bacher, 2004: 4].

Figure 2: *Insects of Sumatra as presented in 1699 by the Frankfurt painter Maria Sybilla Merian* [source: Bacher, 2004: 4].

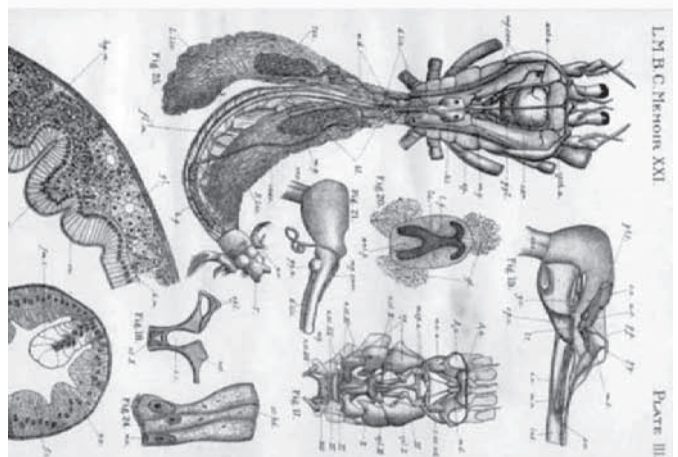
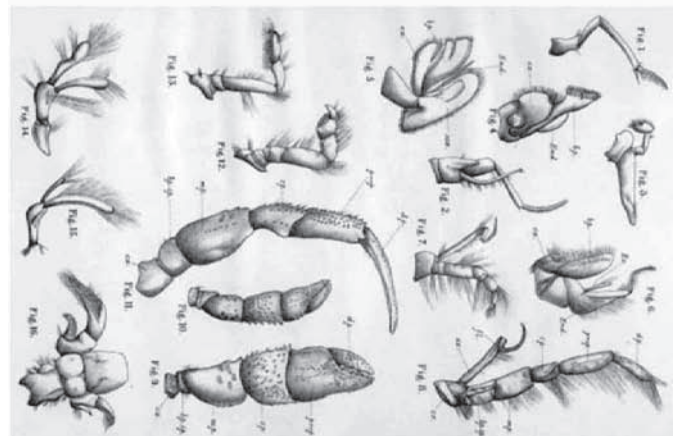
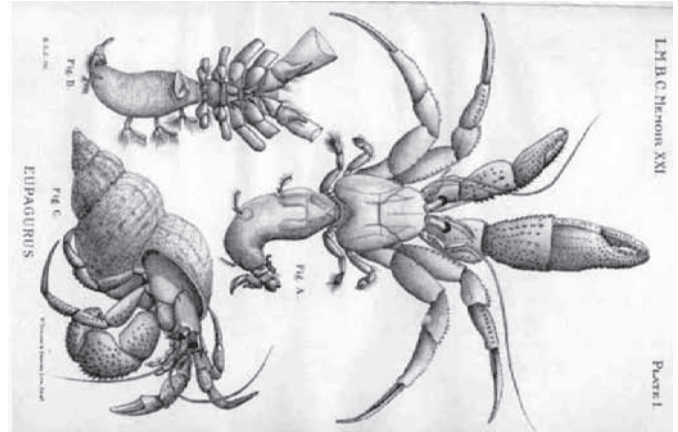


Slika 3: Škarpina – slikar Sydney Parkinson (1768 – 1771) je na otoku Madeira v treh letih naslikal približno 1000 vrst rastlin in 400 živali [vir: Bacher, 2004: 5].

Figure 3: *Grouper – the painter Sydney Parkinson (1768 - 1771) painted during three years on the island of Madeira about 1000 species of plant and 400 animals* [source: Bacher, 2004: 5].

Najprej so grafične predstavitve prikazovale le zunanost organizmov, šele na začetku 19. stol. so se pojavile tudi velikopotezne anatomske študije. 19. stol. je na tem področju

zaznamoval biolog, teoretik in tudi odličen risar Ernst Haeckel. Risbe so imele sicer manjšo globinsko ostrino, narejene pa so bile na podlagi raziskovanja z mikroskopom, kar jim daje znanstveno podlago in so že imele vpliv na arhitekturo in gradbeništvo (slika 4) [Bacher, 2004: 9]

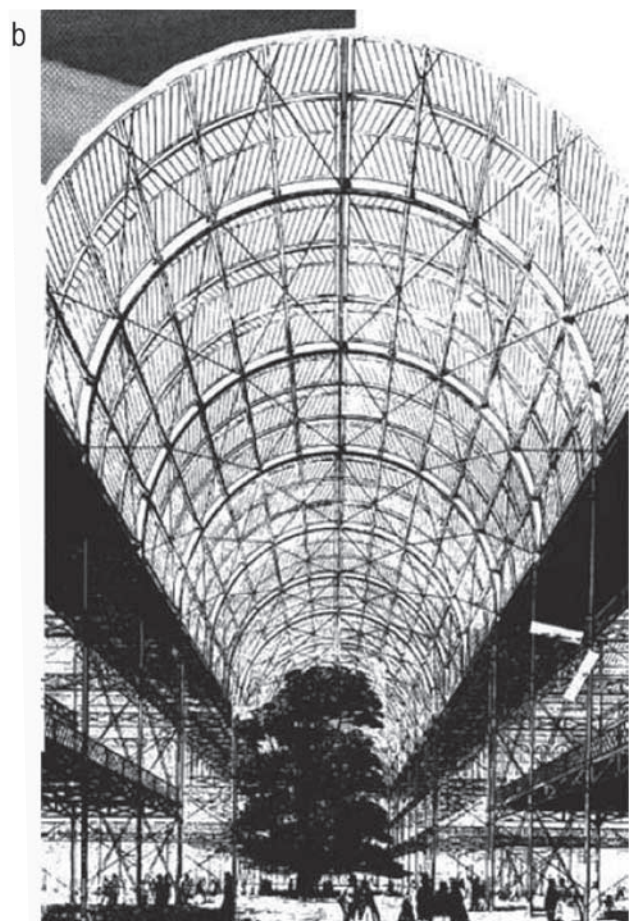


Slika 4: Rak samotar – zunanost, okončine in prebavni trakt – slikar in raziskovalec Ernst Haeckel [vir: Bacher, 2004: 9-10].

Figure 4: *Hermit crab – exterior; limbs and digestive tract – painter and explorer Ernst Haeckel* [source: Bacher, 2004: 9-10].

Tako se je po organizmih zgledoval tudi Sir Joseph Paxton, ki je v začetku 19. stol. ob prvi svetovni razstavi v Londonu zgradil

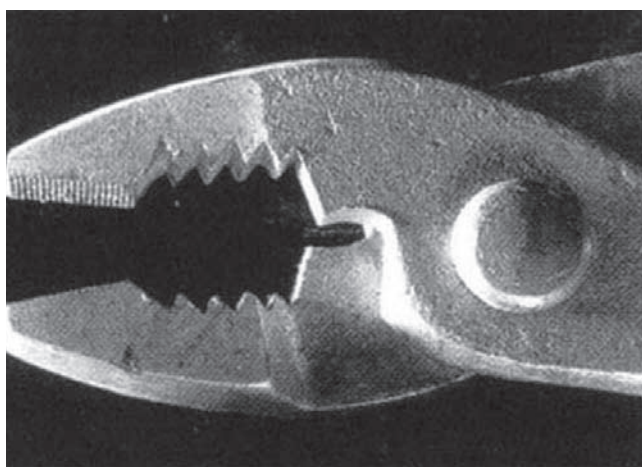
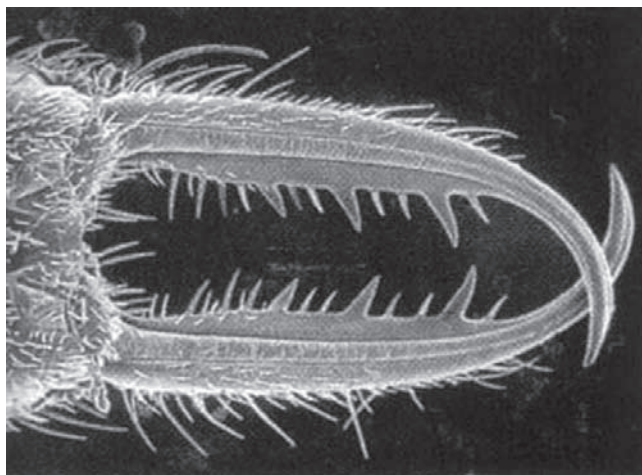
Kristalno palačo. Zgled za členitev velike steklene strehe je bil list orjaškega lokvanja vrste *Victoria Amazonica* (slika 5).



Slika 5: a) list orjaškega lokvanja vrste *Victoria Amazonica* [vir: http://lh6.ggpht.com/_Xn1pWlCvT44/SGaEPF2jTEI/AAAAAAAAABY4/Bz7bMdBxmRA/IMG_0612.JPG] b) prikaz členjenosti zasteklitve na Kristalni palači [vir: Bacher, 2004: 121].

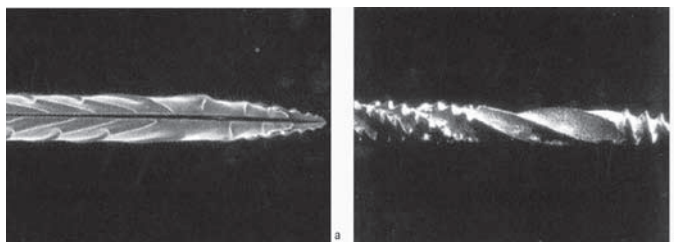
Figure 5: a) leaf of a giant water lily (*Victoria Amazonica*) [source: http://lh6.ggpht.com/_Xn1pWlCvT44/SGaEPF2jTEI/AAAAAAAAABY4/Bz7bMdBxmRA/IMG_0612.JPG] b) display of the segmentation of the glazing of the Crystal Palace [source: Bacher, 2004: 121].

V 20. stol. so bila raziskana številna živa bitja, ki so dala navdih in idejo za različne tehnične rešitve (slike 6, 7, 8 in 9).



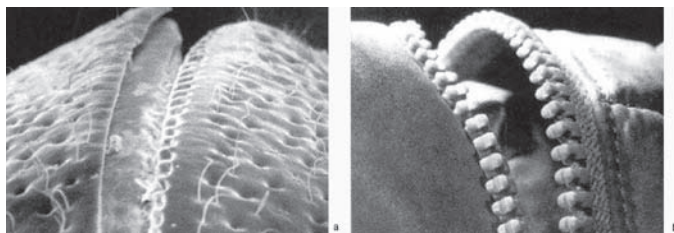
Slika 6: Zgornje klešče ličinke volčka in kombinirane klešče [vir: Bacher, 2004: 21].

Figure 6: The upper pincers of the antlion larva and combined tongs [source: Bacher, 2004: 21].



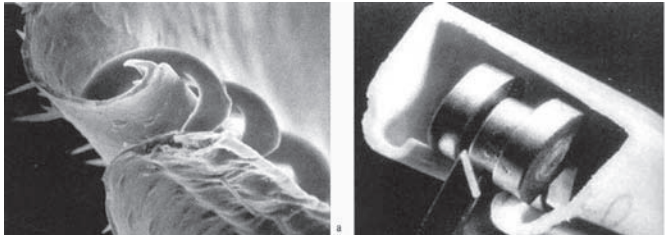
Slika 7: Zavrtač orjaške lesne ose in sveder [vir: Bacher, 2004: 20].

Figure 7: Greater hornail ovipositor and a drill [source: Bacher, 2004: 20].



Slika 8: Sistem zadrge pri pritlikavi hrbotoplovki in tehnična zadruga [vir: Bacher, 2004: 18].

Figure 8: The zipper system in the common backswimmer (water boatman) and a technical zipper [source: Bacher, 2004: 18].



Slika 9: Pritrditev kril pri čebeli in vodilo za zavese [vir: Bacher, 2004: 19].

Figure 9: Attachment of a bee's wings and a curtain runner [source: Bacher, 2004: 19].

Iz sveta živih organizmov se lahko naučimo še marsikaj. Sodobnega bivanja si danes ni mogoče predstavljati brez prezračevalnih naprav. Že od pradavnine si svoja bivališča uspešno in energijsko varčno prezračujejo termiti in čebele. Prav tako imajo nekatera, za naše razumevanje, slabo razvita živa bitja neverjeten občutek za čas (npr. diatomeje, ki živijo ob morski obali in se gibljejo v skladu s plimo in oseko – in to tudi v laboratoriju, kjer ni vode, ki bi jih lahko zalila) in orientacijo (npr. čebele, ki vedno najdejo svoj matični panj, ob tem pa znajo prenesti informacijo o dobri paši tudi drugim čebelam delavkam; ptice selivke ali golobje pismonoše, ki vedno najdejo pot domov). Električna napetost ni izum človeka, električni akumulator ima v sebi več kot 500 vrst rib. Za razsvetljavo pa so kresnice poskrbele precej prej, kot je Thomas Edison izumil žarnico. Vsak ve, da imajo najhitrejša letala reaktivni pogon, redko kdo pa, da ga imata tudi ligenj in hobotnica – v poseben plašč vsrkavata vodo in jo potem iztiskata z močnimi mišicami, in to ju poganja. Termometre človek izpopolnjuje že dobra tri stoletja pa še vedno niso tako izpopolnjeni kot pri nekaterih živalih: komar lahko zazna $1/150^{\circ}\text{C}$, klopotiča celo $1/300^{\circ}\text{C}$. Sonarja netopirjev ali delfinov pa še danes močno prekašata tiste, ki jih je po njunem vzoru ustvaril človek [Heynert, 1972].

V času pospešenega razvoja nanotehnologije v zadnjih letih je prišlo tudi do ponovnega razcveta biomimetike. Na splošno razlikujemo dva pristopa, ki se uporabljata v biomimetiki [Benyus, 1998]:

- biološki zgledi so model za imitacijo, kopiranje in učenje,
- biološki zgledi so inspiracija za nove tehnologije.

V arhitekturi lahko ta dva pristopa ponazorimo na dveh primerih:

- kreiranje novih, biomimetičnih gradiv,
- nove metode v arhitekturnem oblikovanju.

Pri kreiranju novih gradiv se večinoma uporablja prvi pristop, kar je razvidno predvsem pri razvoju gradiv, ustvarjenih z uporabo nanotehnologije. Drugi pristop pa je danes viden predvsem v novih pristopih k oblikovanju arhitekture.

Biomimetična gradiva

Osnova biomimetičnih gradiv so biološki zgledi (živi organizmi), saj so izjemno učinkoviti, z minimalno porabo surovin in izpolnjujejo kompleksne zahteve živih bitij. Prenesti

morajo statične in dinamične obremenitve, upogib, lom, prestati poškodbe, biti fleksibilna ipd. Biomimetična gradiva so umetno ustvarjena gradiva, ki posnemajo naravna gradiva in njihove lastnosti (in jih skušajo dodatno izboljšati) (tabela 1).

biološki zgledi (ustvarja jih narava)	umetna gradiva (ustvarja jih človek)
bazirajo na nekaj elementih (C,N,O,Ca,Si itd.)	bazirajo na celotnem periodnem sistemu
ambientalni temperaturni proces	termo-kemični proces (visoke temperature)
počasna stopnja rasti / produkcije	hitra stopnja proizvodnje
kompleksne, hierarhične strukture	večinoma monolitne strukture ali enostavni kompoziti
kontinuirana zamenjava in obnova	nespremenjena struktura po izdelavi
možnost prilagoditve razvijajočemu okolju	nezmožnost prilagajanja spremembam okolja
spodobnost zaznavanje poškodb in samodejnega popravila	nesposobnost samopopravila
dopuščeno optimalno ("pametno") oblikovanje tako, da ustreza trenutnim varnostnim zahtevam	omejeno oblikovanje glede upoštevanja faktorja varnosti

Tabela 1: Primerjava značilnosti bioloških zgledov in umetnih gradiv [Zwaag, 2007: vii].

Table 1: Comparison between the properties of biological models and artificial materials [Zwaag, 2007: vii].

Biomimetična gradiva se danes razvijajo v naslednjih skupinah gradiv:

- biomimetična nano gradiva
- biomimetične tehnične tekstilije
- biomimetična samozdravilna gradiva

Biomimetična nano gradiva

Nano gradiva so produkti nanotehnologije, ki omogoča obdelavo atomov in molekul (velikost približno 1 nm do 100 nm). V naravi že obstaja nano naprava – to je ribosom (Ribosom je relativno majhen in je zmožen graditi skoraj vsak protein, s tem da zelo natančno veže aminokislino. Ribosom meri v premeru 25 nm (zrno peska ima v povprečju 500 μm oz. 500.000 nm, kar je 20.000-krat več kot ribosom; človeški las ima povprečen premer 50 μm oz. 50.000 nm, torej 2000-krat večjega kot ribosom)). Cilj nanotehnologov je na nano nivoju s pomočjo biomimetike ustvariti podobne naprave, kot so ribosomi.

Trenutno nanotehnologija na področju gradbeništva in arhitekture povečuje razvojne možnosti biomimetičnih gradiv in se širi na skoraj vse družine gradiv kot so plastika, keramika, steklo, beton, kompoziti ter naravna gradiva. Vendar ne gre le za proizvodnjo

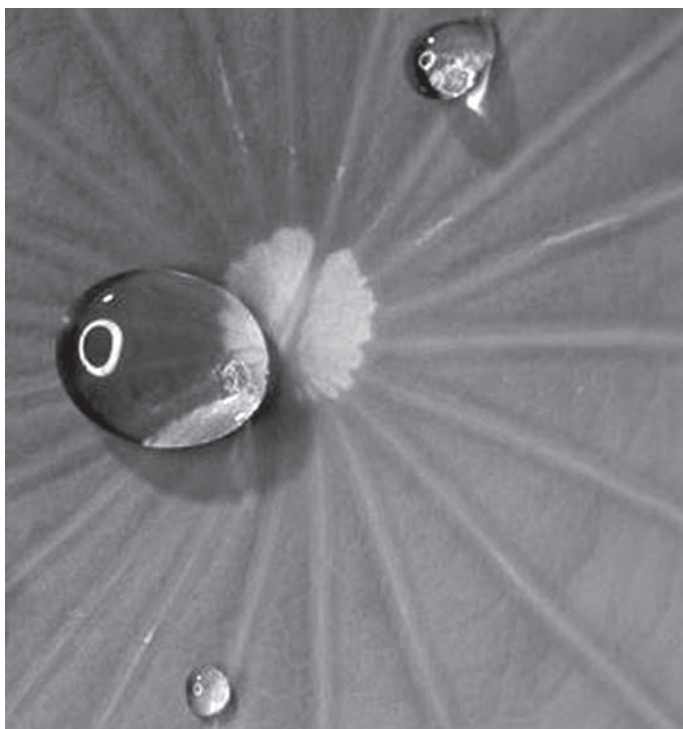
dragih nano gradiv in njihovih izdelkov, ki bi v prihodnosti lahko nadomestili konvencionalna gradiva. Gre za nov koncept kreiranja gradiv, ki se zgleduje po naravi.

Na področju kreiranja nekaterih nano gradiv se trenutno izhaja iz biomimetičnega pristopa, kjer je biologija model za imitacijo, kopiranje in učenje:

- **samočistilne površine: na primeru samočistilnega efekta površine lotusovega lista**

Hidrofobnost rastlin je že bila raziskana, spregledano pa je bilo dejstvo, da se te rastline skorajda ne morejo umazati. V Bonnu so pri 200 različnih rastlinskih vrstah, ki se ne naprašijo, raziskali povezavo med omočljivostjo in samočistilno sposobnostjo in to povezavo tudi eksperimentalno dokazali. Posebno učinkoviti so bili poskusi s ščitastimi listi indijskega lotosa (*Nelumbo nucifera*). Znanstveniki so samočistilni mehanizem poimenovali lotosov efekt, ki je simbol čistosti v azijskih religijah. Lotusov učinek omogočajo mikrostrukture na listni površini in v njih ležeči voščeni kristali, ki merijo le nekaj mikronov (slika 10). Na vodoodbojni površini se ne moreta obdržati ne voda, ne prah [Bappert, 1999: 91].

Gradiva s samočistilnostnim učinkom lahko pripomorejo k varčevanju z vodo in kemičnimi sredstvi ter znižujejo stroške vzdrževanja [Laydecker, 2008: 63].



Slika 10: Hidrofobna površina lotusovega lista [vir: <http://www.core.form-ula.com>].

Figure 10: Water-lily leaf's hydrophobic surface [source: <http://www.core.form-ula.com>].

- **kontrolirana prijemljivost: na primeru gekonov**

Gekon se lahko povzpne po gladkem steklu v eni sekundi približno 1m in podpira lastno težo z enim samim prstom. Na

blazinicah na nogah ima namreč na milijone 10-20 μm dolgih dlačic (mikroskopski laski). Vsaka dlačica se konča s približno 1000 blazinicami na konicah (spatulae), ki dopuščajo blizek stik z dano površino (slika 11).

Te zmožnosti so sprožile zanimanje za imitiranje gekonovega mehanizma sprijemljivosti (npr. razvoj modela, ki bi s tako površino lahko deloval pod vodo, v čistih, vakuumskih prostorih ali v vesolju) [Bar-Cohen, 2006].



Slika 11: Gekoni živijo v toplih tropskih in subtropskih predelih in so izjemni plezalci, saj lahko plezajo po navpičnih stenah in stropovih [Bappert, 1999: 46]. Znanstveniki so dolgo skušali ugotoviti, od kod takšne izredne lastnosti. Odgovor so našli v nanotehnologiji. [vir: <http://www.core.form-ula.com>].

Figure 11: Geckos live in warm tropical and sub-tropical regions of the world and are extraordinary climbers. They can traverse vertical walls and ceilings [Bappert, 1999: 46]. Scholars have long tried to discover from where these abilities came. The answer was found by nanotechnology [source: <http://www.core.form-ula.com>].

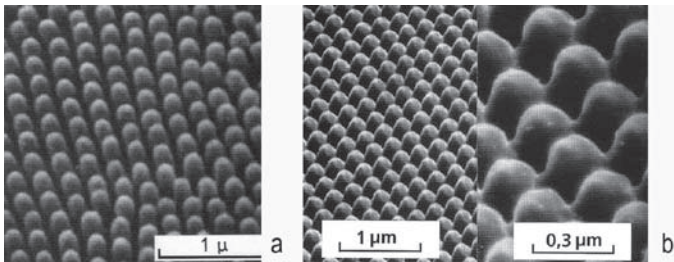
- **trdnost in elastičnost gradiva: analiza lastnosti lesa na nano nivoju**

Morfološka zgradba in kemična struktura določata biomehanske lastnosti lesa, kot sta trdnost in elastičnost. Šele natančnejša spoznanja o zgradbi celične stene, ki so osvetlila poznavanje karakteristika loma in preoblikovanja lesa, kakor tudi spoznanja o vplivu temperature in vlage na les, dopuščajo biomimetične zaključke za lesene izdelke in konstrukcije. Senzacionalni posnetki, ki so nastali pod posebno obremenitvijo lesa, vodijo do novih spoznanj o medsebojnih orientacijah posameznih plasti celične stene. Drevesa s prefinjeno »lahko strukturo« in ob izredno varčni sestavi materiala dosegajo togost in odpornost proti lomu ter so kos vsem statičnim in dinamičnim upogibnim in torzijskim zahtevam zaradi dodatne obremenitve. Te lastnosti

določa razporeditev kot tudi sestava vseh plasti v celični steni, ki so medsebojno natančno usklajene in tvorijo izjemno nosilno ogrodje [Bappert, 1999: 74].

• **odbojnost gradiva: primer nočnega metulja (Heterocera)**

Že v začetku 60. let so na roženičnih lečah mrežastih oči nočnih metuljev odkrili izredno drobne površinske strukture. Te strukture merijo le 0,015 do 0,040 mm in zmanjšujejo odboj svetlobe. Odboj se zmanjša, prepustnost svetlobe pa poveča. Zanimivo je, da imajo tovrstne strukture le nočno aktivne žuželke, kar jim pomaga pri pravočasnem odkrivanju sovražnikov. Prednosti mimikrije bi se namreč izgubile, če bi se metulju velike mrežaste oči ob svetlobi zableščale [Bappert, 1999].



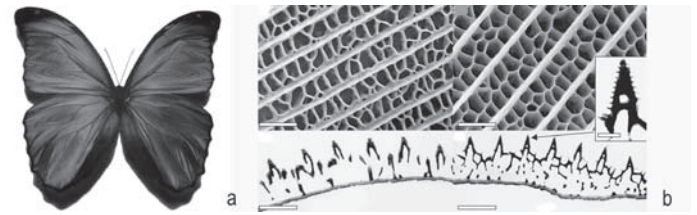
Slika 12: Odbojnost [vir: Bappert, 1999: 64-65].
a) Stožčaste izbokline očesa nočnega metulja so pravilno razporejene, druga od druge so oddaljene le 0,0002 mm.
b) Umetno izdelana mikrostruktura na osnovi strukture metuljevega očesa namenjena za izdelavo prozornih, širokopasovnih odbojnih plasti.

Figure 12: Reflectance [source: Bappert, 1999: 64-65].
a) The conical convexities of the night butterfly's eye are regularly arranged; the distance between them is a mere 0.0002mm.
b) Artificial microstructure based on a butterfly eye; intended for the production of transparent, broadband reflective layers.

Na Fraunhoferjevem inštitutu za solarne energetske sisteme v Freiburgu so tako imenovani »učinek metuljevega očesa« uporabili za izdelavo prozornih odbojnih vrhnjih plasti (slika 12). S sprejemljivimi stroški proizvajajo mikrostrukture z več kot 0,00022 mm natančnostjo. Na ta način naraste prepustnost stekla čez 98 %. Neodbojno steklo prepušča samo 91,5 % svetlobe. Zaradi visokih cen mikrostruktur z njimi še ni mogoče nadomestiti običajnih slojev, ki zmanjšujejo bleščavost na steklih očal in objektivov. Ti sloji so uglašeni le na vidni del svetlobnega spektra (od 380-1800 Nm valovne dolžine). To je izrednega pomena pri uporabi v solarni tehniki: zaradi odboja svetlobe izgubijo steklene površine na obeh straneh stekla pri vpadnem kotu 0° približno 4% energije, pri vpadnem kotu 70° pa približno 17% energije. Mikrostrukturirane površine s širokopasovnim delovanjem, posnete po vzorcih iz narave, bi lahko te izgube občutno zmanjšale [Bappert, 1999: 65].

• **barve: na primeru metulja: papilio ulyssus**

Barvo metulja papilio ulyssus ustvarja interakcija svetlobe z nanostrukturno metuljevih kril. Fizikalni barvni efekt, in ne efekt pigmenta, je zanimiv za oblikovalce in arhitekta (slika 13).



Slika 13: a) metulj papilio ulyssus [vir: <http://www.polyvore.com>, 31.1.2009]
b) nanostruktura črnega področja metuljevih kril (leva struktura – lesketajoč efekt, desna struktura – mat efekt) [vir: <http://newton.ex.ac.uk>, 31.1.2009].

Figure 13: a) the Ulysses butterfly (*Papilio ulysses*) [source: <http://www.polyvore.com>]
b) nanostructure of the black section of a butterfly's wings (left structure – brilliant effect; right structure – opaque) [source: <http://newton.ex.ac.uk>].

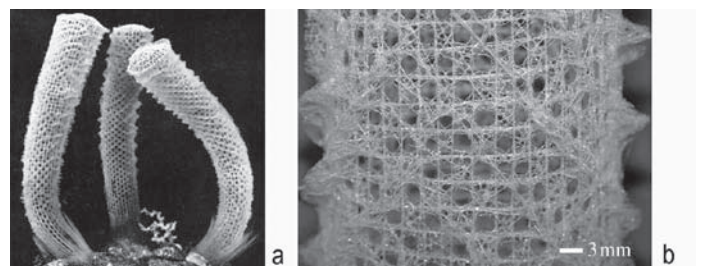
Biomimetične tehnične tekstilije

Tehnične tekstilije so tekstilije iz različnih »high tech« ali visokokvalitetnih vlaken (z izjemo kovinskih žic in njihovih izdelkov), ki pri spremembah okoliških pogojev dalj časa ohranijo fizikalne lastnosti. Ta vlakna z zelo dobrimi trdnostnimi in odpornostnimi lastnostmi so steklena, keramična, aramidna in karbonska vlakna, razvijajo pa se tudi t.i. pametna vlakna z izrednimi fizikalnimi in kemičnimi lastnostmi, ki bodo uporabi tehničnih tekstilij v prihodnosti dali povsem novo dimenzijo (npr. ogljikove nanocevkke).

Biološki sistemi so vzor tudi za nadaljnji razvoj biomimetičnih tehničnih tekstilij. Znanih je nekaj primerov iz narave, ki so lahko osnova za izboljšanje tehničnih vlaken, sestavnega dela tehničnih tekstilij:

• **globokomorska goba Euplectella aspergillum**

S poizkusi na globokomorski gobi *Euplectella aspergillum* skušajo znanstveniki v laboratoriju Bell Labs v ZDA izpopolniti obliko optičnih kablov iz steklenih vlaken. Cilj poizkusa je ugotoviti, kako so lahko vlakna, ki rastejo pri skrajno nizkih temperaturah, še vedno dovolj fleksibilna (slika 14). Kabli optičnih steklenih vlaken se proizvajajo z uporabo visokih temperatur in so zelo krhki in lomljivi [Braddock, O'Mahony, 2005: 293].



Slika 14: a) *Euplectella aspergillum* pripada skupini steklenih morskih gob Hexactinellida. Njihova posebnost je, da imajo skelet sestavljen iz mikroskopskih kremenovih iglic [vir: <http://www.gutenberg.org>]
b) Povečan del rešetkaste strukture morske gobe [vir: Aizenberg et al., 2005: 276].

Figure 14: a) *Euplectella aspergillum* is a glass sponge of the Hexactinellida class. Their particularity is a skeleton made entirely of microscopic siliceous spicules. [source: <http://www.gutenberg.org>, 31.1.2009]
b) A magnified section of the porous structure of a sea sponge [source: Aizenberg et al., 2005: 276].

• pajkova mreža

Vir biomimetičnih raziskav je tudi pajkova mreža. Krožno zasnovana mreža sestoji iz izredno lahkih, vendar trdnih, skoraj nevidnih kontinuiranih niti, ki so med seboj povezane s tisočermi stiki [Offermann, 2003]. Mreža je odporna na vodo, veter in sončno svetlobo. Svilen nit, ki jo producira pajek, prekaša trdnost visoko tehnološko razvitih gradiv, kot npr. kevlar, ki se uporablja v neprebojnih jopičih, letalski industriji, oziroma povsod, kjer so potrebna lahka in trdna vlakna (slika 15). Čeprav se svilena pajkova nit proizvaja v vodi, sobni temperaturi in pod pritiskom, je velikokrat močnejša od jekla. Natezna trdnost radialne pajkove niti je 1154 MPa, medtem ko pri jeklu znaša le 400 MPa [Vogel, 2003]. V zadnjem času napredki na področju nanotehnologije obljublajo proizvodnjo vlaken, ki bodo izredno trdna, lahka in kontinuirana [Bar-Cohen, 2006].



Slika 15: Pajkova mreža iz trdnih in lahkih niti [Vir: Braddock, O'Mahony, 1998].
Figure 15: Spider web made of strong and lightweight threads [Source: Braddock, O'Mahony, 1998].

Biomimetična samozdravilna gradiva

Malo je gradiv, ki jih je ustvaril človek, in bi imele boljše lastnosti od bioloških zgledov (živih organizmov). Od vseh lastnosti, ki jih imajo biološki zgledi, pa je prav sposobnost samopopravila oz. samozdravljenja izjemna. Samozdravilni pojav v gradivih, ki jih je izdelal človek, ni popolnoma nov. Dobro znan primer samozdravilnega delovanja v anorganskih gradivih je v antični malti, ki so jo uporabljali Rimljani za gradnjo objektov in infrastrukture [Riccardi et al, 1998]. Malta je vezivo, ki povezuje opeko in naravni kamen, nima izjemnih mehanskih lastnosti in vendar je vzdržala več kot dvajset stoletji. Ta izredna trajnost gradiva je posledica kemične reakcije med malto in vlago v zraku, ki simultano zapre razpoke, kar omogoča kontrolirano taljenje in ponovno zgoščevanje gradiva [Sanchez-Moral, 2004]. Ker se reakcija zgodi »in situ«, se gradivo prilagaja geometriji razpoke. Rimska malta se uvršča h gradivom z idealnimi samozdravilnimi lastnostmi. Razlogi, da se taka malta danes ne uporablja, so preagresivna atmosfera moderne družbe in čas, ki je potreben za njen nanos [Zwaag, 2007: 11].

Antična malta je najbrž edino umetno gradivo, ki vsebuje zametke samozdravilnih lastnosti bioloških zgledov. Večina dela znanstvenike na tem področju še čaka. Razvoj in kreacija

samozdravilnih gradiv za uporabo na področju gradbeništva in arhitekture je vizionaren in ambiciozen poseg. Oblikovanje samozdravilnih gradiv, ki bi jih potencialno lahko uporabljali v arhitekturi in gradbeništvu, črpa inspiracijo iz bioloških sistemov, kjer se z nastankom poškodbe nemudoma prične proces samozdravljenja.

Samozdravilna gradiva so gradiva, ki se šele raziskujejo in v prihodnosti napovedujejo revolucionarne spremembe na področju arhitekture in gradbeništva.

Procesi samozdravilnega delovanja gradiv

Pred usodno poškodbo konstrukcije se v gradivu pojavijo »nevidne« mikro razpoke, ki lahko vodijo do večjih razpok in ogrožajo varnost konstrukcije. Klasični pristop k izpopolnjevanju kakovosti konvencionalnega gradiva je težnja po boljši trdnosti gradiva in upočasnjevanju nastanka mikro in makro razpok. Vendar prej ali slej še tako optimirano gradivo podleže razpokam. Pri določanju umetnih samozdravilnih gradiv se kot osnova uporablja biomimetični pristop, ki skuša samozdravilne lastnosti bioloških zgledov (živih organizmov) prenesti na področje gradiv, ki bi se uporabljala v industriji, tudi v gradbeništvu in arhitekturi [<http://www.selfhealingmaterials.nl>].

Gradiva so se do sedaj razvijala in sledila paradigmi »zaščita pred poškodbo«. Tipično za današnja gradiva je, da nivo poškodbe v gradivu (mikro in makro-razpoke) ostane konstanten, oziroma narašča, vendar nikoli simultano ne pojenja. Pri bioloških zgledih je koncept ravno obraten. Tkiva bioloških zgledov se ne izogibajo potencialnim razpokam, nastanek razpok je dovoljen, vendar je tkivo zmožno poškodbe kontinuirano zaznavati in jih samodejno zaceliti oz. popraviti. Neposredno celjenje takšne poškodbe je lahko avtonomno ali pa s pomočjo zunanega vpliva. Iz biološkega sveta poznamo mehanizme, ki so sposobni kontinuirano zaznavati poškodbo in jo popraviti. Raziskovalci se trudijo vpeljati te lastnosti v umetna gradiva, ki jih izdeluje človek. Naslanjajo se na dva procesa delovanja gradiv [Zwaag, 2007]:

1. proces preprečevanja poškodbe

Pri oblikovanju gradiv se sledi osnovnim trem vodilom: postavitve vseh atomov na »pravo« mesto med proizvodnim ciklom gradiva; postavitve atomov v konfiguracijo tako, da jim bo gibanje onemogočeno; uskladitev proizvodnje gradiva tako, da se izogne proizvodnim poškodbam

2. proces obvladovanja poškodbe

Alternativni koncept, ki oblikuje področje samozdravilnih gradiv, je t.i. proces upravljanja s poškodbo. Paradigma temelji na ideji, da sama poškodba ni problematična, dokler obstaja možnost avtonomnega procesa »odprave« poškodbe. Končni učinek samozdravilnega gradiva je odvisen od velikosti nastanka poškodbe in potrebnega obsega zdravljenja poškodbe.

Načini samozdravljenja gradiv

Da bi bilo gradivo samozdravilno, je potrebno udejanjiti zahtevo, da poškodbe gradiva več ali manj simultano izginejo. Prazen prostor, kjer je nastala poškodba, mora biti zapolnjen z novo

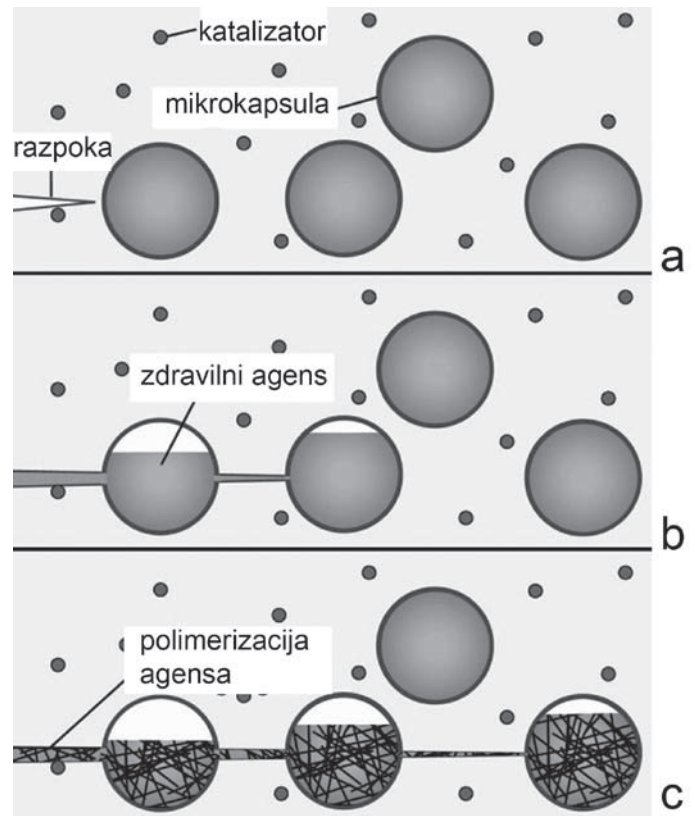
snovjo. Znanstveniki morajo torej oblikovati delno mobilnost v totem gradivu, kar je popolnoma nov koncept, netipičen za konvencionalna gradiva. Zdravilna snov se mora premakniti do poškodovanega območja (prisotna je mobilnost atomov), trajno povezati površini med seboj in hkrati izgubljeni možnost premikanja. Prehod med začetnim gibanjem in kasnejšim fiksiranjem v prostoru se lahko realizira s temperaturno amplitudo, kemijsko reakcijo in drugimi procesi. Prav tako je pomembno, da je gradivo med časom popravila v nepremičnem položaju [Zwaag, 2007]. Pri samozdravilnih gradivih v grobem obstajata dve stopnji [http://www.selfhealingmaterials.nl]:

- gradivo z minimalno samozdravilno lastnostjo – pri gradivu, ki ima minimalno samozdravilno lastnost, se lahko le delno popravi poškodbo in to le enkrat. Za uspešno izvedbo gradivo potrebuje vpliv zunanega dejavnika. Lastnosti tega gradiva so lahko slabše od lastnosti konvencionalnih gradiv, njihova cena pa je višja.
- gradivo z idealno samozdravilno lastnostjo – gradivo z idealno samozdravilno lastnostjo bo popolnoma popravilo nastalo škodo v gradivu in sicer večkrat ter popolnoma avtonomno. Lastnosti takšnega gradiva so enake oziroma boljše od lastnosti konvencionalnih gradiv, hkrati pa je poceni.

Samozdravilne lastnosti se bodo lahko aplicirale na skoraj vse družine gradiv. Pri njihovem razvoju se pričakuje, da se bodo najprej uporabljala gradiva z nižjo stopnjo samozdravljenja, postopoma pa se bodo v ospredje postavila gradiva z idealnimi samozdravilnimi lastnostmi [http://www.selfhealingmaterials.nl].

Aktualne raziskave

Raziskovalne skupine po svetu razvijajo samozdravilne mehanizme za vse osnovne skupine gradiv: kovine, keramike, polimere in kompozite. Samozdravilni procesi se raziskujejo s pomočjo ustreznih kemičnih snovi [Trask, 2007], ki polimerizirajo zdravilno snov (agens) v poškodovanem gradivu (slika 16).



Slika 16: Samozdravilni koncept mikrokapsulacije [vir: White, 2001].

- razpoke se pojavijo v matrici
- pretrganje mikrokapsul in razlitje zdravilnega agensa v razpoko
- samozdravilni agens v stiku s katalizatorjem sproži proces polimerizacije, ki med seboj poveže razpoke.

Figure 16: The self-curing concept of microcapsulation [source: White, 2001].

- cracks appear in the matrix
- microcapsules break open and deliver the curing agent into the crack
- the self-curing agent in contact with the catalyst triggers the process of polymerisation and fills up the cracks.

Eden izmed učinkovitih načinov proizvodnje avtonomnega samozdravilnega gradiva je shranjevanje zdravilnega agensa, ki po poškodbi delno obnovi mehanske lastnosti gradiva. Prof. Scott White, eden najvidnejših in najuspešnejših raziskovalcev, je s svojo skupino na univerzi v Illinoisu razvil v gradivu sistem mikrokapsul v votlih vlaknih. Mikrokapsule, polnjene s tekočim lepilom, se nahajajo v običajni matrici, kot sta epoksi ali beton. Razpoka, ki se pojavi v sistemu, sproži pretrganje mikrokapsule. Tekoče lepilo zapolni nastali prazen prostor, fiksiran v določen položaj. V tem konceptu obstaja popolna ločitev funkcij. Matrica omogoča mehansko trdnost gradiva, medtem ko zdravilni povzročitelj (agent) nima funkcije vse dokler ne pride do poškodbe. Takšno gradivo postane potencialno samozdravilno [Zwaag, 2007: 12].

• primer: biomimetični mikrovaskularni avtonomni kompoziti

V raziskavah je problematičen omejen postopek samozdravilnih procesov, saj se po raztrganju mikrokapsule popolnoma izčrpa količina zdravilnega agensa. Rešitev omejenih virov samozdravilnega agensa je cirkulacijski sistem (vzor je delovanje v bioloških sistemih), ki kontinuirano napolnjuje

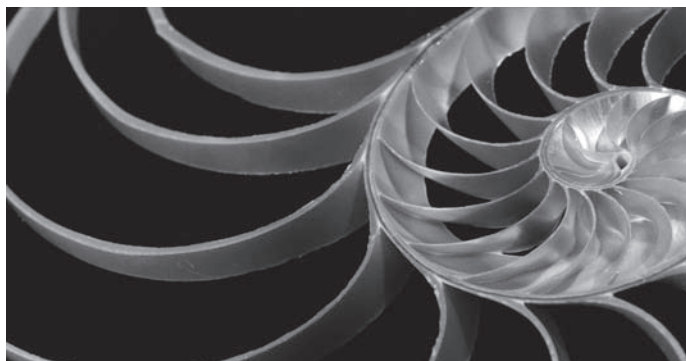
gradivo. Cirkulacijska mreža pa ni le mehanizem za dovod agensa, temveč hkrati omogoča obstoj molekularnih sprožilcev in senzorjev ter nudi dodatno funkcijo gradiva, kot sta samodiagnoza in regulacija temperature [Zwaag, 2007: 41]. Nov pristop je tehnični izziv za oblikovanje medsebojno povezanega, tridimenzionalnega »ožilja« samozdravilnih gradiv [Zwaag, 2007: 42].

Študije bodo vsebovale podrobne analize zdravljenja gradiv na podlagi bioloških zgledov, da bi se lahko razvili biomimetični, samozdravilni sistemi gradiv. Raziskovalna skupina na ameriški univerzi v Illinoisu že ustvarja nova mikrovaskularna gradiva, ki bodo imele večkratne, samozdravilne lastnosti, vzorec za raziskave pa je človeška koža [Toohey et al, 2007].

Biomimetrična arhitektura

Čeprav je na področju biomimetike viden izjemen napredek, je narava še vedno superiorna. Nekatero osnovne metode in oblike se lahko kopirajo, vendar se ideje iz narave najbolj prilagodijo, kadar človeku služijo kot vzor ali inspiracija in tako pripomorejo k izpopolnjenim rezultatom [Bar-Cohen, 2006].

Z razvojem in rastjo oblik se je že v začetku dvajsetega stoletja ukvarjal Sir D'Arcy Thompson, angleški zoolog in matematik, ki je leta 1917 svojo teorijo razložil v knjigi »On Growth and Form«, kjer poudarja, da na biološke oblike ni vplivala zgolj evolucija, temveč so imeli nanje prav tako pomemben vpliv zakoni matematike, fizike in mehanike, ki se zrcalijo v matematičnih vzorcih struktur (slika 17). Problem oblike je matematični problem, problem njene rasti pa po Thompsonovo, problem fizike [Thompson, 1992].

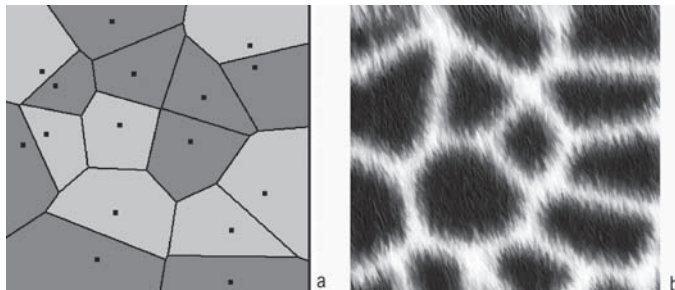


Slika 17: Rast spiralne oblike Nautilusa [vir: <http://photography.nationalgeographic.com/>, 27.1.2009].

Figure 17: The growth of the Nautilus shell spiral [source: <http://photography.nationalgeographic.com/>, 27.1.2009].

Trenutno se trendi v oblikovanju sodobne arhitekture osredotočajo na razvojne procese in sisteme, katerih osnova so digitalni inženiring, kompleksne geometrije in principi biologije. Za generiranje arhitekturnih oblik se danes uporabljajo različne računske metode. Zanimanje za metodologijo računalniških izračunov – s pomočjo programov, parametričnega modeliranja in generativnih tehnik – se kaže v arhitekturnih projektih svetovnih arhitektov, predvsem mlajše generacije. Naravne zakone se skuša matematično modelirati, kar je osnova za nadaljnjo računalniško obdelavo. Eden takih primerov je Voronoi-jev diagram (imenuje

se po ruskemu matematiku Georgy-ju Voronoi-ju). To je poseben način razdelitve metričnega prostora, ki je določena z razdaljo od izbrane diskretne množice točk (slika 18 a). To (navidez) naključno razdelitev površine je mogoče najti tudi v naravi, npr. na vzorcu žirafine kože (slika 18 b) [Pottman et al, 2007].



Slika 18: a) Voronoi-jev diagram [vir: <http://www.emeraldinsight.com/fig/1740260309005.png>]

b) Vzorec žirafine kože (primer Voronoi-jevega diagrama, ki ga je ustvarila narava [vir: [http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_\(voronoi_diagram\)](http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_(voronoi_diagram))]).

Figure 18: a) A Voronoi diagram [source: <http://www.emeraldinsight.com/fig/1740260309005.png>].

b) A sample of giraffe skin (an example of a Voronoi diagram created by nature) [source: [http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_\(voronoi_diagram\)](http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_(voronoi_diagram))].



Slika 19: Stanovanjski objekt in studio v Tokiu, arhitektura: Studio M, Tokio, Hajime Masubuchi [vir: Domeisen, 2008].

Figure 19: A residential structure and studio in Tokyo, architecture: Studio M, Tokyo, Hajime Masubuchi [source: Domeisen, 2008].

Primeri aplikacije Voronoi-jevega diagrama je fasadna obloga zgradbe v Tokiu, ki je oblikovana s posebno računalniško programsko opremo (slika 19). Nastala celična struktura je bila modificirana z različnimi parametri z uporabo računske metode voronoi-jevega diagrama. Fasada iz aluminija je bila izdelana s programsko opremo CNC (computer numeric control), to je program za numerično računalniško vodenje strojnih orodij med proizvodnjo [Domeisen, 2008].

Z uporabo radikalno–revolucionarne geometrije se je pojavil popolnoma nov pristop k oblikovanju arhitekture. Oblikovanje temelji na zakonitostih biologije in se v arhitekturo vpeljuje z

uporabo različnih pristopov (algoritmčnih, parametričnih...). V naprednih arhitekturnih krogih postaja izraz morfogeneza (gr. morphê – oblika, genesis – kreacija, slovstven izraz "začetek oblike") nov, moderni termin. Najprej se je uporabljal na področju bioloških ved, nanaša pa se na porajanje oblik in ustvarjanje vzorcev v nekem organizmu prek procesov rasti in diferenciacije [Leach, 2008: 96].

Ker je biologija arhitektom inspiracija za raziskovanje morfogeneze, biomimetika postaja važno področje za nadaljnje raziskovanje arhitekturnega oblikovanja. Narava nas lahko nauči veliko o učinkovitosti določenih strukturalnih organizacijah. Raziskovanja, ki so jih na tem področju razvijali arhitekti Antono Gaudi, Otto Frei, danes z digitalno kompjutacijo [Leach, 2008: 96] inovativnih projektov nadaljujejo Zaha Hadid, Mark Goulthorpe, Mark Burry, Lars Spuybroek idr. Uporaba fleksibilne geometrije, ki omogoča red, brez absolutne ponovitve (npr. Voronoi), je le eden izmed mnogih primerov nove generacije arhitekturnih oblik.

Zaključek

Biomimetika je uvedla nove pristope pri raziskovanju novodobnih oblik, tehnologij in gradiv. Tudi v arhitekturi se je pojavil nov izziv – razvila se je nova, radikalno – revolucionarna geometrija, ki prav tako temelji na zakonitostih biologije in predstavlja nove trende v sodobnem oblikovanju. Računalniška tehnologija danes ni več le pripomoček, ki nadomesti arhitektovo risalo in papir, temveč soustvarja arhitekturno obliko, na katero vplivajo različni parametri, ki so tako kot v naravni morfologiji, ključnega pomena.

Še večji razmah biomimetika predstavlja na področju gradiv. Dejstvo je, da redko katero, če sploh katero, umetno ustvarjeno gradivo s svojimi lastnostmi presega žive tvorbe, ki jih je v procesu evolucije izoblikovala narava. V zadnjih letih se tako proučuje žive organizme, ki so kot biološki zgledi osnova za razvoj gradiv, ki bodo soustvarjala naše grajeno okolje v prihodnosti: biomimetična nano gradiva, biomimetične tehnične tekstilije in biomimetična samozdravilna gradiva. Vse tri skupine posnemajo procese v naravi in jih na svoj način aplicirajo tudi v umetne tvorbe. Nanotehnologija bo prispevala gradiva, ki bodo imela samočistilne lastnosti, izjemne statične lastnosti ob majhni porabi surovin in energije za proizvodnjo, po koncu uporabe pa ne bodo obremenjevala okolja, imela bodo izjemne optične lastnosti itd. Tehnične tekstilije, ki si že nekaj časa utirajo pot v arhitekturo, bodo po bioloških zgledih postale fleksibilne v vseh vremenskih pogojih, ob tem pa bodo imela tudi izjemne natezne in tlačne trdnosti. V kratkem pa se bodo pojavila tudi gradiva, ki bodo sposobna popravljanja poškodb, ki nastajajo v fazi njihove uporabe. Na ta način se bodo znižali stroški vzdrževanja zgradbe in podaljšala življenjsko dobo gradivom.

Na podlagi proučevanja narave in naravnih procesov se je torej v zadnjih letih začela razvijati nova družina gradiv, ki bo že v bližnji prihodnosti vplivala na arhitekturno oblikovanje.

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.
- Aizenberg, J. et al (2005): Skeleton of *Euplectella* sp.: structural hierarchy from the nanoscale to the macroscale. *Science* 309, str. 275-278, (DOI: 10.1126/science.1112255)
- Bacher, G., (2004): *Suche nach der räumlichen Qualität in organischen Strukturen*. doktorska disertacija, Technische Universität Wien, Wien.
- Bappert, R., Benner, S., et al. (1999): *Bionika*. Tehniški muzej Slovenije, Ljubljana.
- Bar-Cohen, Y. (2006): *Biomimetics, biologically inspired Technologies*. Taylor&Francis Group, Pasadena, California, USA.
- Benyus, J. M. (1998): *Biomimicry: Innovation inspired by Nature*. Perennial (HarperCollins) Press, New York, str. 1-103.
- Braddock, S., O'Mahony, M. (1998.): *Techno Textiles, Revolutionary Fabrics for Fashion and Design*. Thames and Hudson, London.
- Braddock, S., O'Mahony, M. (2005): *Techno Textiles 2, Revolutionary Fabrics for Fashion and Design*. Thames and Hudson, London.
- Domeisen, O., 2008: *Apartmenthaus und Studios in Tokio*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH&Co.KG, Detail 10/2008, München.
- Heynert, H., (1972): *Einführung in die allgemeine Bionik*. Berlin.
- Leach, N. (2005): *Digitalna morfogeneza*. Oris, časopis za arhitekturo i kulturo, št. 51, Arhitekt, Zagreb.
- Leydecker, S. (2008): *Nano materials*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- Offermann, P. (2003): *Textile Verbundbauweisen für den Leichtbau*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart – Leipzig.
- Pottmann, H. et al (2007): *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press, Exton, Pennsylvania.
- Riccardi M. P. et al (1998): Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars. *Thermochim Acta* 321 (1-2), str. 207-214, (doi:10.1016/S0040-6031(98)00461-4).
- Sanchez-Moral, S. Garcia et al (2004): Carbonation kinetics in roman-like lime mortars. *Materiales de construcción*, Castineira libreria tecnica, Spain, str. 23-38.
- Spiller, N. (2008): *Digital architecture now. A global survey of emerging talent*, Thames&Hudson Ltd, London.
- Thompson, D. W. (1992): *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Canto edition, Cambridge.
- Toohey, K. S. et al (1992): Self-healing materials with microvascular networks. *Nature Materials* 6, str. 581 – 585, (doi:10.1038/nmat1934).
- Trask, R.S. et al (2007): Self-healing polymer composites: mimicking nature to enhance performance. *Bioinspiration and Biomimetics*. 2. 1-9. (10.1088/1748-3182/2/1/P01).
- Uradni list Evropske unije C 185/1
- Vogel., S. (2003): *Comparative Biomechanics: Life's Physical World*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- White, S. R. et al (2001): Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 409, 794-797, (doi:10.1038/35057232).
- Wilson, M. et al (2002): *Nanotechnology, Basic science and emerging technologies*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.
- Zwaag, S. V. D. (2007): *Selfhealing materials, an alternative approach to 20 centuries of materials science*. Springer Verlag, Dordrecht.
- Biomimetika - oblikovanje z naravo, <http://www.core.form-ula.com/2008/04/15/biomimetics-design-by-nature/>, <31.1.2009>
- Bionika, <http://wissen.spiegel.de/wissen/dokument/b/i/o/dokument.html?titel=Bionik&id=Bionik&top=Wikipedia&suchbegriff=bionik&quellen=&qcrubrik=computer>, dostopno <14.1.2009>
- Evropske direktive, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2006:185:0001:0009:SL:PDF>, <31.1.2009>
- Samozdravilna gradiva, <http://www.selfhealingmaterials.nl/Meerjarenplan%20IOP%20Self%20Healing%20Materials%20BSymposium%20SHM.pdf>, <31.1.2009>
- Vzorec žirafine kože, Voronoi-jev diagram, [http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_\(voronoi_diagram\)](http://aviary.com/artists/mpeutz/images/giraffe_skin_(voronoi_diagram)), <31.1.2009>

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