

Aleksandra Lobnik^{1,2}, Marijana Lakić¹, Aljoša Košak^{1,2}, Matejka Turel², Špela Korent Urek²
in Andreja Gutmaier^{1,2}

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor

² IOS, d.o.o., Inštitut za okoljevarstvo in senzorje, Beloruska 7, 2000 Maribor

Uvod v nanomateriale za uporabo v tekstilih

Introduction to Nanomaterials for Use in Textiles

Pregledni znanstveni članek/Scientific Review

Prispelo/Received 05-2013 • Sprejeto/Accepted 05-2013

Izvleček

Ko se velikost materialov zmanjša v eni ali več dimenzijah, se njihove fizikalne in kemijske lastnosti bistveno spreminjajo zaradi naraščanja razmerja med površino in volumnom. V tekstilni industriji se uporabljajo tako nanodelci kot nanostrukturni materiali, nanokompoziti in nanovlakna. Uporabljajo se predvsem kot funkcionalne tekstilije, ki imajo specifične lastnosti. V prispevku so obravnavani nanomateriali, ki imajo antistatično, antimikrobno, samočistilno in ojačitveno funkcijo. V nadaljnjih prispevkih bodo predstavljeni nanomateriali za razvoj hidrofobnih, UV-zaščitnih in ognjevarnih tekstilij. Posebno področje so pametne tekstilije z integriranimi nanosenzorji ali tekstilije z nadzorovanim sproščanjem aktivnih komponent, zdravil ali dišav. Zadnji prispevek bo v posebnem poglavju obravnaval učinke in tveganja nanotehnologij/nanomaterialov za okolje in zdravje.

Ključne besede: nanoznanost, nanotehnologija, nanomateriali, antistatične tekstilije, ojačene tekstilije, protibakterijske tekstilije, samočistilne tekstilije

Abstract

When the dimensions of materials reduce in one or more dimensions, their physical and chemical properties significantly vary due to the increasing surface-to-volume ratio. Today, the textile industry uses nanoparticles and nanostructured materials, nanocomposites and nanofibres, which are primarily used as functional textiles with specific characteristics. In this paper, we present nanomaterials with an antistatic, antimicrobial, self-cleaning and reinforcement function. Moreover, some nanomaterials for the development of hydrophobic, UV-resistant and fire-resistant fabrics are presented. A specific topic includes smart textiles with embedded nanosensors, and fabrics with a controlled release of active ingredients, drugs or fragrances. Furthermore, a separate chapter deals with the effects and risks of nanotechnologies/nanomaterials for the environment and health.

Keywords: nanoscience, nanotechnology, nanomaterials, conductive textiles, reinforced textiles, antimicrobial textiles, self-cleaning textiles

1 Uvod

Nanoznanost je področje poznavanja lastnosti neke materije na nanoravni in proučuje osnovne mehanizme formiranja novih nanostruktur, njihove organizacije in transformacije ter vključuje interdisciplinarne raziskave njihovih fizikalnih in kemijskih lastnosti [1]. Nanotehnologija je nekaj let star termin za sintezo,

manipulacijo in kontrolo posameznih molekul ali delcev z velikostjo pod 100 nm. Izraz izvira iz predpone »nano«, ki je uporabljena v sistemu SI za milijardinko metra oz. 10^{-9} m. Besedo nanotehnologija je leta 1974 prvi uporabil profesor Norio Taniguchi ter podal tudi njeno definicijo, in sicer je nanotehnologijo definiral kot proizvodno tehnologijo, s katero dosežemo izjemno natančnost in ultramajhne dimenzije [2].

Vodilna avtorica/Corresponding author:

red. prof. dr. Aleksandra Lobnik

Telefon: +386 2 220 79 12

E-pošta: aleksandra.lobnik@ios.si

aleksandra.lobnik@um.si

Tekstilec, 2013, letn. 56, št. 2, str. 137–144

Danes je osnovni namen nanotehnologij razvijanje ekonomsko in okolju prijaznih učinkovitih metod za oblikovanje nanostrukturnih materialov. Materiali na nanoravni se nahajajo med kvantnim efektom atomov in molekul. Sprememba z makro- in mikropodročja v nanopodročje kvalitativno modifikira večino fizikalno-kemijskih lastnosti materialov. Ko se velikost materialov zmanjša v eni ali več dimenzijah, se njihove fizikalne in kemijske lastnosti lahko bistveno spremenijo zaradi ekstremnega naraščanja razmerja med površino in prostornino [3]. Nanotehnologijo lahko najdemo na vseh področjih obstoječe industrije, od kemijske, tekstilne, računalništva in informatike, transporta, energetike, avtomobilske, še posebno pa v medicini, biotehnologiji, farmaciji in obrambni industriji. Nanotehnologija nam omogoča izdelavo materialov ali naprav, ki so lažji, hitrejši, močnejši, ki imajo popolnoma nove ali pa dodatne, specifične lastnosti [2]. V tekstilnem sektorju se pričakuje, da bo nanotehnologija omogočila razvoj novih nanomaterialov, ki imajo popolnoma nove lastnosti ali kombinacijo različnih lastnosti v enem izdelku. Tako je z zdravstvenega in okoljskega vidika integracija nanomaterialov v/na tekstilije priložnost in tveganje hkrati. Na eni strani nam nanotehnologije/nanomateriali omogočajo alternativo potencialno nevarnim kemikalijam, npr. nadomeščanje sredstev za zaviranje gorenja, ali pa lahko z njeno pomočjo razvijemo okolju prijaznejše metode proizvodnje. Na drugi strani lahko nove nanotehnologije/nanomateriali pomenijo tveganja za zdravje človeka in morebitne negativne okoljske vplive. Ob nadzorovanju in omejevanju le-teh se je treba zavedati pomanjkanja relevantnih zakonodajnih meril [4].

2 Vrste nanomaterialov in področja njihove uporabe v tekstilstvu

Za natančno poznavanje in razumevanje raznolikosti nanomaterialov je najbolj tipična klasifikacija le-teh glede na njihove dimenzije. Kot je prikazano na sliki 1, so nanomateriali lahko klasificirani kot ničdimezijski (0-D) (nanodelci), enodimezijski (1-D) (nano-cevke), dvodimezijski (2-D) in tridimezijski (3-D). Takšna klasifikacija se nanaša na število dimenzij, ki so na nanoravni (pod 100 nm) [5]. V grobem lahko nanomateriale delimo tudi na nanodelce, nanostrukturne materiale, nanokompozite in nanovlakna. Nanodelci se lahko uporabljajo kot

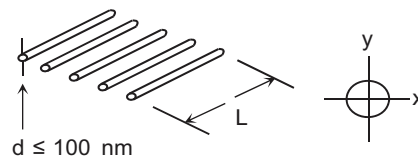
0-D

Vse dimenzije (x, y, z) v nanovelikosti



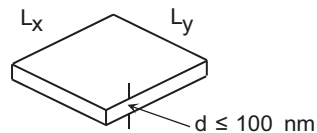
1-D

Dve dimenziji (x, y) v nanovelikosti, druga (L) ni



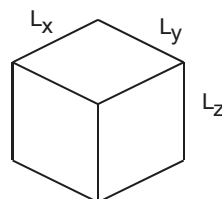
2-D

Ena dimenzija (d) v nanovelikosti, drugi dve (L_x , L_y) nista



3-D

Nobena od dimenzij ni v nanovelikosti



Slika 1: Klasifikacija nanomaterialov glede na dimenzije [5]

polnilo za pripravo polimernih nanokompozitov, lahko pa tudi samostojno kot katalizatorji, v analitske, medicinske in druge namene. Po sestavi so lahko kovinski (Au, Ag, Ni, ...), anorganski oksidi (SiO_2 , feriti, glina in drugi alumosilikati) ter organski (saje, razplaščeni grafit, ogljikove nanocevke, fullerani, celulozna in hitinska vlakna). Med nanostrukturne materiale uvrščamo množico kemijsko ali fizikalno urejenih materialov, katerih strukture so velike nekaj nanometrov, npr: nanoporozne materiale, blok kopolimere, nanostrukturne nanose, nanorešetke in tekoče kristale. Ti materiali vsebujejo nanovelika kristalna zrna, ki so povezana s tridimenzionalnimi amorfnimi mejnimi prostori in so eno- ali večfazno polikristalinična. Kompoziti so materiali, sestavljeni iz vsaj dveh materialov, od katerih eden pomeni kontinuirano fazo ali osnovo, medtem ko je drugi v njej bolj ali manj homogeno

Preglednica 1: Obdelava tekstilnih materialov z nanomateriali, ki izboljšajo njihove prevodne lastnosti

Nanomaterial	Tekstilni material	Metoda izdelave	Integracija na tekstilni substrat
Nanodelci bakra	Polipropilen (PP) Poliamid (PA)	Fizikalni parni nanos [15]	Homogen nanos bakra
Nanodelci aktivnega oglja	Poliuretan (PU)	Elektropredenje [16]	Nanovlakna (z vključenimi nanodelci)
Ogljikove nanocevke (CNT) / polianilin	PP	Potapljanje v disperzijo polianilina in CNT [12]	Nanos CNT/polianilina na in v votlih PP vlaknih
Nanonanos polipirola	Viskoza	Polimerizacija iz raztopine [13, 14]	Homogen nanos polipirola
	Bombaž	Potapljanje [13, 14]	Nehomogen, neporozen nanos
Nanonanos polianilina	Poliester (PES)	Polimerizacija iz raztopine [20]	Polianilinski nanos na PES
–	Polipirol / Vinilpirolidin	Elektropredenje [21]	Nanovlakna 100 nm
–	Polipirol / PU	Elektropredenje [22]	Nanovlakna
–	Polipirol / Etilenoksid	Elektropredenje [23]	Nanovlakna 70–300 nm
	Polipirol / NaDEHS		

porazdeljen in ga imenujemo polnilo ali armirno sredstvo. Nanodelci, ki se največkrat uporabljajo za pripravo polimernih nanokompozitov (v raziskavah ali že v proizvodnji), so predvsem plastni silikati (gline) in ogljikove nanocevke. Med kompozitne materiale v širšem pomenu besede štejemo tudi nanose, v katerih se uporabljajo SiO_2 in razni drugi kovinski oksidi (ZrO_2 , TiO_2) [4, 6–8].

V tekstilni industriji se uporabljajo tako nanodelci kot nanostrukturni materiali, nanokompoziti in nanovlakna. Glede na literaturne vire so najpomembnejša področja raziskav prevodne, protimikrobne in samočistilne tekstilije. Čedalje več pa je tudi referenc pri uporabi nanomaterialov za razvoj hidrofobnih, ojačenih, UV-zaščitnih in ognjevarnih tekstilij. Posebno področje so tudi pametne tekstilije z integriranimi nanosenzorji ali tekstilije z nadzorovanim sproščanjem aktivnih komponent, zdravil ali dišav. Posebno pozornost zahtevajo učinki in tveganja nanomaterialov za okolje in zdravje.

2.1 Antistatične tekstilije

Antistatične lastnosti tekstilij dosežemo s povečanjem prevodnosti vlaken. Sintetični tekstilni polimeri, kot sta polipropilen (PP) in polietilen (PE),

imajo na splošno relativno nizko električno prevodnost in so kot taki izolatorji. Če želimo doseči prevodnost materiala, vendar ohraniti dobre mehanske lastnosti polimera, lahko prevodnost dosežemo z dodatkom nanomaterialov v obliki kovinskih nanodelcev, na primer bakrovih nanodelcev na površini polipropilenskih in poliamidnih vlaken [15], z nanonanosi prevodnih polimerov, kot sta npr. polipirol in polianilin, ter z vgradnjo ogljikovih nanocevk v polimerno matrico [9–14]. Enak učinek se lahko doseže z dispergiranjem nanodelcev aktivnega oglja v polimerno raztopino/talino [16, 17]. Večina raziskav se osredinja na vpliv dodatka nanomaterialov na končne mehanske lastnosti tekstilij. Opazili so, da dodatek nanomaterialov za izboljšanje prevodnosti tekstilij lahko izboljša tudi njihove mehanske lastnosti, kot sta elastičnost in natezna trdnost [17–20]. Večina prevodnih nanovlaken je pripravljena po postopku elektropredenja na osnovi polipirola, ki mu zaradi izboljšanja obdelovalnih lastnosti dodajajo različne polimere, kot so npr. vinilpirolidin [21], poliuretan [22] ali polietilenoksid [23], ki izboljšajo procesne parametre in vplivajo na končne morfološke karakteristike nanovlaken. Vsebnost polipirola vpliva tudi na končne prevodne lastnosti

nanovlaken. Pokazalo se je, da imajo nanovlakna, pripravljena iz polipirola in di(2-etilheksil)sulfocianatne natrijeve soli (NaDEHS) [23], prevodnost $2,7 \times 10^{-2}$ S/cm, kar je približno štirikrat več od prevodnosti nanovlaken, pripravljenih iz polipirola in polietilenoksida. Razloga sta najverjetneje dva, in sicer visoka interna prevodnost in tudi molekularna orientacija prevodnih domen, ki se inducirajo med elektropredenjem.

2.2 Ojačene tekstilije

Nanomateriale lahko uporabimo za izboljšanje nekaterih mehanskih lastnosti tekstilnih vlaken. Te lastnosti so natezna trdnost, elastičnost ali togost vlaken [18–21, 24] in omogočajo izdelavo močnejših ali prožnejših vlaken in izboljšanje odpornosti tekstilij na trganje in nošenje. Najbolj raziskan način izboljšanja mehanskih lastnosti tekstilij je vgradnja ogljikovih nanocevk, saj te znatno izboljšajo natezno trdnost ali elastičnost [9–14, 25]. Z ogljikovimi nanocevkami ojačena vlakna se po navadi proizvajajo s talilnim postopkom, ki vključuje taljenje polistirena (PS) ali polipropilena (PP) [25, 26], z vsebnostjo ogljikovih nanocevk. Poleg ogljikovih nanocevk lahko tekstilije utrdimo z uporabo nanodelcev ZnO [27], ki povečajo togost vlaken, z nanodelci Al_2O_3 , ki izboljšajo pretržno trdnost [25], s SiO_2 nanodelci [28], ki izboljšajo odpornost tekstilij na drgnjenje [28].

2.3 Protibakterijske tekstilije

Glede na literaturo [29] lahko biocidne tekstilije razdelimo v (i) tekstilije s fotoaktivnimi lastnostmi, (ii) tekstilije z nedifuznimi biocidi ali (iii) tekstilije s kontroliranim sproščanjem vgrajenega aktivnega nanosa (biocida ali kovinskih protibakterijskih agensov).

Dober primer biocidne tekstilije iz prve skupine je tekstilija s fotokatalitskim polprevodniškim nanosom TiO_2 in vrzelo v frekvenčnem pasu 3,2 eV, ki nastane pri vzbujanju materiala z UV-svetlobo [28]. Ta vrzel v frekvenčnem pasu lahko izkorišča svetlobo valovne dolžine pod 400 nm; primerna valovna dolžina je 360 nm [31]. Svetlobi izpostavljen TiO_2 je eden najmočnejših oksidantov, kar je posledica visokega oksidacijskega potenciala vrzeli v valenčnem pasu. Polprevodni fotokatalizator TiO_2 absorbira fotone z energijami, enakimi oz. večjimi od nje gove vrzeli v frekvenčnem območju ali začetne energije. Vsak foton s potrebno energijo (valovno dolžino), ki trči z elektronom v zasedenem valenčnem pasu atoma polprevodnika, lahko dvigne ta elektron na nezaseden prevodni pas, kar povzroča vzbujena stanja elektronov v prevodnem pasu in pozitivne praznine v valenčnem pasu [30]. Ta elektron ima zelo veliko oksidacijsko energijo in ima sposobnost razgraditi anorganske in organske kemijske vezi. Lahko tudi reagira s kisikom, kar vodi do nastanka hidroksidnih radikalov, ki lahko oksidirajo celične membrane mikroorganizmov [32]. Pozitivno nabite elektronske vrzeli lahko povzročijo oksidacijo organskih molekul in tako omogočajo razgradnjo madežev. Zato se nanosi z nanodelci TiO_2 uporabljajo tudi za samočiščenje tekstilij. Poleg tega, da mora biti idealen fotokatalizator stabilen, poceni, netoksičen, mora biti v omenjeni aplikaciji visokofotoaktiven [30] z zadostno energijo vrzeli za katalizo kemičnih reakcij. Zato se kot alternativa TiO_2 uporabljajo tudi nekateri drugi polprevodniki, kot so WO_3 , SrTiO_3 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, ZnO, ZnS itd. V drugi skupini biocidnih tekstilij je biocidno sredstvo imobilizirano v samo tekstilno osnovo ali pa je na osnovi kot nanos. Do protibakterijskega učinka pride zaradi interakcije med pozitivno nabitimi

Preglednica 2: Obdelava tekstilnih materialov z nanomateriali, ki izboljšajo njihove mehanske lastnosti

Nanomaterial	Tekstilni material	Metoda izdelave	Integracija na tekstilni substrat
Ogljikove nanocevke (CNT)	Polivinilalkohol (PVA)	Modificiran proces pređenja [15]	CNT nanos
	Polistiren (PS)	Talilni proces [13, 14]	Nanokompozit CNT/PS
	Ni specificiran	Potapljanje [16]	CNT klastri
Nanodelci ZnO	Bombaž	Postopek »dip-pad-dry-cure« [27]	Nanos ZnO
Nanodelci Al_2O_3	Ni specificiran	Potapljanje [25]	Nanos Al_2O_3
Nanodelci SiO_2	Poliester (PES)	Postopek sol-gel [28]	Nanos SiO_2

Preglednica 3: Obdelava tekstilnih materialov z nanomateriali, ki izboljšajo njihove protibakterijske lastnosti

Nanomat.	Tekstilni material	Metoda izdelave	Integracija na tekstilni substrat
Nanodelci Ag	Poliester (PES) Bombaž	Postopek »dip-pad-dry-cure« [35, 39]	Nanos Ag nanodelcev
Nanokompozit PA/Ag	Polipropilen (PP)	Polimerni koncentrat (an. <i>masterbatch</i>), predenje iz taline [44]	Nanokompozit PA/Ag
Nanodelci TiO ₂	Bombaž	Postopek sol-gel [35–38]	Nanos TiO ₂
	Bombaž	Kemijski parni nanos (CVD) [38]	Nanos TiO ₂
Nanodelci Ag + TiO ₂	Bombaž	Postopek »dip-pad-dry-cure« [33]	Nanos Ag/TiO ₂
Nanodelci ZnO	Bombaž	Postopek »dip-pad-dry-cure« [34]	Nanos ZnO
»Core shell« hitozan-polibutilakrilat (PBA)	Bombaž	Postopek »dip-pad-dry-cure« [45]	Nanos »core shell«
Nanos SiO ₂ /biocid	Ni specificiran	Postopek sol-gel [28]	Nanos SiO ₂

biocidi in negativno nabitimi celičnimi membranami. Pozitivno nabiti biocidi »poškodujejo« celično membrano mikroorganizmov ter inhibirajo njihovo rast in reprodukcijo [28].

V tretji skupini so biocidne tekstilije, ki imajo aktivne nanose, iz katerih lahko biocidi oziroma kovinski agensi difundirajo. Pri kovinskih protibakterijskih agensih nanodelci v nanosu oksidirajo s pomočjo zraka. Pri tem nastanejo kationi, ki difundirajo iz nanosa in zavirajo rast bakterij [28]. Za doseganje biocidnega učinka se največ uporabljajo nanodelci Ag in TiO₂ ter njihove kombinacije [33]. Protibakterijski učinek se lahko doseže tudi z vgradnjo nanodelcev ZnO [34], s hitozanskimi nanodelci »core-shell« za obdelavo bombažnih tekstilij, z vključevanjem različnih organskih (npr. hitozan) in anorganskih biocidov (Ag, Cu) v silikatni nanos [28].

Številni literaturni viri navajajo nanos nanodelcev TiO₂ na tekstilije s pomočjo postopka sol-gel [35–38]. Metode nanosov so zelo različne, od postopka »dip-pad-dry-cure« [33, 34, 39] za nanos Ag, ZnO in Ag/TiO₂ na tekstilije, metode »layer-by-layer« [40] za nanos Ag na tekstilije, plazemske polimerizacije Ag [41], do nanosa nanodelcev TiO₂ s kemijsko parno metodo (CVD) [42]. V nasprotju s postopki, pri katerih dobimo nanose z biocidnimi sredstvi, lahko med zgodnjimi fazami proizvodnega

procesa tekstilij, npr. med samim procesom taljenja taline, dodamo nanodelce Ag in polimer [43], ali pa pri proizvodnji Ag/PP polimernega koncentrata (an. *masterbatch*) in naknadnega predenja iz taline [44].

2.4 Samočistilne tekstilije

Samočistilno sposobnost tekstilij lahko dosežemo s tremi različnimi metodami. Prva je integracija nanodelcev, ki imajo vlogo fotokatalizatorja in so kot taki sposobni razgradnje organskih nečistoč in madežev [29, 32]. Druga metoda je proizvodnja superhidrofobnih površin, ki odbijajo umazanijo in se lahko same očistijo s polzečimi vodnimi kapljicami (»lotus-efekt«) [32, 46]. Antiadhezivne površine pa lahko ustvarimo tudi s pomočjo nanoinženiringa [28].

Samočistilne tekstilije s fotokatalitičnimi nanosi je mogoče proizvesti s pomočjo nanozrnatega TiO₂. Nanosol TiO₂ se sintetizira in nanese na tekstilijo s tehniko »dip-pad-dry-cure«. Tako so bile obdelane bombažne tkanine, tkanine iz mešanice volna-poliamid in iz poliestrskih vlaken [29, 35–37]. Kadar so tekstilije s temi nanosi izpostavljene sončni svetlobi, se elektroni TiO₂ vzbudijo in preidejo na višji energijski nivo, pri tem pa nastanejo hidroksidni radikali [29]. Kot je bilo že omenjeno, so ti radikali zmožni oksidacije organskih snovi, ki se lahko adsorbirajo na površino madežev in tako razgradijo

Preglednica 4: Obdelava tekstilnih materialov z nanomateriali, ki dajejo tekstilijam samočistilne sposobnosti

Nanomat.	Tekstilni material	Metoda izdelave	Integracija na tekstilni substrat
Nanodelci TiO_2	Bombaž Volna/poliamid (PA) Poliester (PES)	Postopek sol-gel [29, 35–37]	Nanos TiO_2

Preglednica 5: Obdelava tekstilnih materialov z nanomateriali, ki dajejo tekstilijam samočistilne sposobnosti na podlagi hidrofobnih lastnosti

Nanomat.	Tekstil.mat.	Metoda izdelave	Integracija na tekstilni substrat
Ogljikove nanocevice (CNT)	Bombaž	Postopek »dip-dry-cure« [46]	Klastri CNT
Nanodelci SiO_2	Bombaž	Postopek »dip-dry-cure« [47]	Nanos SiO_2
Nanodelci fluoroakrila	Poliester (PES) Poliamid (PA)	Nanodisperzna emulzijska polimerizacija [48]	Nanos fluoroakrilata

umazanijo. Ker tako nastali radikali napadajo tudi mikroorganizme, imajo samočistilne tekstilije tudi protibakterijski učinek.

Samočistilne tekstilije s hidrofobnimi nanosi je mogoče proizvesti z različnimi emulzijsko polimerizacijskimi tehnikami in s pomočjo vgradnje ogljikovih nanocevk, nanodelcev SiO_2 in polimernih nanodelcev, ki vsebujejo fluor [46–48]. Tako je mogoče doseči hidrofobne lastnosti površin, podobne lotusovemu efektu [46].

3 Sklepi

Iz pregleda literature je razvidno, da se v zadnjih letih raziskave na področju razvoja novih nanomaterialov, ki omogočajo specifične lastnosti tekstilij, nenehno širijo. Raziskave so še večinoma laboratorijske, le nekaj nanomaterialov se že uporablja v realnih tekstilijah in jih najdemo na trgu, predvsem za doseganje protibakterijskih in samočistilnih efektov. Pričakovati je, da se bo realna uporaba nanomaterialov v tekstilijah v prihodnjih letih bistveno povečala.

V nadaljnjih prispevkih bomo predstavili še nanomateriale na področju uporabe hidrofobnih, UV-zaščitnih in ognjevarnih tekstilij; nanomateriale pri uporabi pametnih tekstilij ter učinke in tveganja nanomaterialov za okolje in zdravje.

Viri

1. GUOZHONG, Cao. *Nanostructures and nanomaterials: synthesis, properties, and applications*. London: Imperial College Press, 2004, 433 str.
2. SIEGFRIED, Barbara. *NanoTextiles: functions, nanoparticles and commercial applications*. Semester thesis in the frame of the »Nanosefe-Textiles« project TVS Textilverband Schweiz and EMPA, December, 2007 [online]. [citirano maja 2013]. Dostopno na: <http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/78337/---/l=1>.
3. TIBBALS, HARRY. F. *Perspectives in nanotechnology. Medical nanotechnology and nanomedicine*. Florida: CRC Press, 2011, 527 str.
4. Nanopremazi – nanodelci – nanokompoziti – nanotehnologija [online]. [citirano aprila 2013]. Dostopno na: <<http://www.nanosvet.com/Nanotehnologija/nanotehnologija.html>>.
5. LOBNIK, Aleksandra, TUREL, Matejka, KORENT UREK, Špela in KOŠAK, Aljoša. Nanostructured materials use in sensors: their benefits and drawbacks. V *Carbon and Oxide Nanostructures. Synthesis, Characterisation and Applications. Serie Advanced Structured Materials*. Uredil N. Yahya. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, vol. 5, str. 307–354.

6. Nanomateriali [online]. [citirano aprila 2013]. Dostopno na: <<http://www.nanosvet.com/Nanotehnologija/nanotehnologija.html>>.
7. Nanocomposites, their uses and applications [online]. [citirano aprila 2013]. Dostopno na: <<http://www.understandingnano.com/nanocomposites-applications.html>>
8. Seminar kvantne pike [online]. [citirano aprila 2013]. Dostopno na: <<http://sites.google.com/site/fiztrixxx/studij/seminar-quantne-pike>>.
9. LÜBBEN, J. Funktionale Fasern und Textilien. *Tec 21: Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt*, 2005, vol. 41, str. 10–13.
10. DALTON, A. B. et al. Continuous carbon nanotube composite fibers: properties, potential applications, and problems. *Journal of Materials Chemistry*, 2004, vol. 14, str. 1–3.
11. HECHT, D. S., HU, L. in GRUNER, G. Electronic properties of carbon nanotube/fabric composites. *Current Applied Physics*, 2007, vol. 7, str. 60–63.
12. PINKS, G. M. S. et al. Actuation behaviour of layered composites of polyaniline, carbon nanotubes and polypyrrole. *Synthetic Metals*, 2005, vol. 151, str. 85–91.
13. FOITZIK, R. C., KAYNAK, A. in PFEFFER, F. M. Application of soluble poly (3-alkylpyrrole) polymers on textile. *Synthetic Metals*, 2006, vol. 156, str. 637–642.
14. DALLACQUA, L. et al. Vapour phase polymerisation of pyrrole on cellulose based textile substrates. *Synthetic Metals*, 2006, vol. 156, str. 379–386.
15. WEI, Q. F. et al. Surface characterization of functional nanostructures sputtered on fiber substrates. *Surface & Coatings Technology*, 2006, vol. 201, str. 1821–1826.
16. HWANG, J., MUTH, J. in GHOSH, T. Electrical and mechanical properties of carbon-black filled, electrospun nanocomposite fiber webs. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 104, str. 2410–2417.
17. GOTTSCHALK, F. *Umwelt- und Gesundheitseinwirkungen von Kohlenstoff-Nanoröhren: Entwurf einer Risikobewertung mit besonderer Betrachtung potenzieller Applikationen in textilen Fasern*. Master-Thesis on the Institute for Human-Environment Systems, ETH Zürich, 2006.
18. CHANG, T. E. et al. Microscopic mechanism of reinforcement in single wall carbon nanotube/polypropylene nanocomposites. *Polymer*, 2005, vol. 46, str. 439–444.
19. HAGENMUELLER, R. et al. Production and characterization of polymer nanocomposites with highly aligned single walled carbon nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2003, vol. 3, str. 105–110.
20. ARMES, S. P. et al. Morphology and structure of conducting polymers. *Langmuir*, 1991, vol. 7, str. 1447–1452.
21. SRIVASTAVA, Y., MARQUEZ, M. in THORSEN, T. Multijet electrospinning of conducting nanofibers from microfluidic manifolds. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, vol. 106, str. 3171–3178.
22. YANILMAZ, M. et al. Studies on Increasing Conductivity of Polyurethane Films and nanofibers, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol III, WCE London, UK, 2011.
23. CHRONAKIS, I. S., GRAPENSON, S. in JAKOB, A. Conductive polypyrrole nanofibers via electrospinning: electrical and morphological properties. *Polymer*, 2006, vol. 47, str. 1597–1603.
24. STEGMAIER, T. Nanopartikel – Anwendungen und mögliche Risiken, Institut für Textil und Verfahrenstechnik Denkendorf, Stuttgart, 2006.
25. KALARIKKAL, S. G., SANKAR, B. V. in IFJU, P. G. Effect of Cryogenic Temperature on the Fracture Toughness of Graphite/Epoxy Composites. *Journal of engineering materials and technology*, 2006, vol. 128, str. 151–157.
26. MIAUDET, P. et al. Hot-drawing of single and multiwall carbon nanotube fibers for high toughness and alignment. *Nano Letters*, 2005, vol. 5, str. 2212–2215.
27. YADAV, A. et al. Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles. *Bulletin of Material Sciences*, 2006, vol. 29, str. 641–645.
28. MAHLTIG, B., HAUF, H. in BOTTCHE, H. Functionalization of textiles by inorganic sol-gel coatings. *Journal of Materials Chemistry*, 2005, vol. 15, str. 4385–4398.
29. DAOUD, W. A., XIN, J. H. in ZHANG, Y. H. Surface functionalization of cellulose fibers with titanium dioxide nanoparticles and their combined bactericidal activities. *Surface Science*, 2005, vol. 599, str. 69–75.
30. HOFFMANN et al. Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chem. Review*, 1995, vol. 95, str. 69–96.

31. VORMBERG, R. Highly dispersed titanium dioxide from a pigment to marvel of versatility, elements. *Degussa Science Newsletter*, 2004, vol. 9, str. 21–23.
32. PARKIN, I. in PALGRAVE, R. Self-cleaning clothes. *Journal of Materials Chemistry*, 2004, vol. 15, str. 1689–1695.
33. YURANOVA, T. et al. Performance and characterization of Ag-cotton and Ag/TiO₂ loaded textiles during the abatement of E-coli. *Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry*, 2006, vol. 181, str. 363–369.
34. VIGNESHWARAN, N. et al. Functional finishing of cotton fabrics using zinc oxide-soluble starch nanocomposites. *Nanotechnology*, 2006, vol. 17, str. 5087–5095.
35. WALID, A. D. in Xin, J. H. Nucleation and growth of anatase crystallites on cotton fabrics at low temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, vol. 87, str. 953–955.
36. Qi, K. H. et al. Self-cleaning cotton. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, vol. 16, str. 4567–4574.
37. BOZZI, A., YURANOVA, T. in KIWI, J. Self-cleaning of wool-polyamide and polyester textiles by TiO₂-rutile modification under daylight irradiation at ambient temperature. *Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry*, 2005, vol. 172, str. 27–34.
38. DAOUD, W. A. in XIN, J. H. Low temperature sol-gel processed photocatalytic titania coating. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 2004, vol. 29, str. 25–29.
39. LEE, H. J., YEO, S. Y. in JEONG, S. H. Antibacterial effect of nanosized silver colloidal solution on textile fabrics. *Journal of Materials Science*, 2003, vol. 89, str. 2199–2204.
40. DUBAS, S. T., KUMLANGDUDSANA, P. in POTIYARAJ, P. Layer-by-layer deposition of antimicrobial silver nanoparticles on textile fibers. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, vol. 289, str. 105–109.
41. HEGEMANN, D., HOSSAIN, M. M. in BALAZS, D. J. Nanostructured plasma coatings to obtain multifunctional textile surfaces. *Progress in Organic Coatings*, 2007, vol. 58, str. 237–240.
42. SZYMANOWSKI, H. et al. Plasma enhanced CVD deposition of titanium oxide for biomedical applications. *Surface & Coatings Technology*, 2005, vol. 200, str. 1036–1040.
43. JEONG, S. H., YEO, S. Y. in Yi, S. C. The effect of filler particler size on the antibacterial properties of compounded polymer/silver fibers. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, str. 5407–5411.
44. YEO, S. Y., LEE, H. J. in JEONG, S. H. Preparation of nanocomposite fibers for permanent antibacterial effect. *Journal of Materials Science*, 2003, vol. 38, str. 2143–2147.
45. WEIJUN, Y. et al. Novel core-shell particles with poly(n-butyl acrylate) cores and chitosan shells as an antibacterial coating for textiles. *Polymer*, 2005, vol. 46, str. 10538–10543.
46. LIU, Y. et al. Artificial lotus leaf structure from assembling carbon nanotubes and their application in hydrophobic textiles. *Journal of Materials Chemistry*, 2006, vol. 17, str. 1071–1078.
47. YU, M. et al. Superhydrophobic cotton fabric coating based on a complex layer of silica nanoparticles and perfluorooctylated quaternary ammonium silane coupling agent. *Applied surface science*, 2007, vol. 253, str. 3669–3673.
48. HUANG, P. Y., CHAO, Y. C. in LIAO, Y. T. Preparation of fluoroacrylate nanocopolymer by miniemulsion polymerization used in textile finishing. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, vol. 94, str. 1466–1472.