

# Nanorészecskék és -technológiák a textiltermékek gyártásában

Kutasi Csaba

*Alábbi cikkünk a Budapesti Kereskedelmi és Iparkamara (BKIK) Kézműipari Tagozata Épülettisztító Szakmai Osztályának 2012. május 24-én rendezett I. Nano fórumán elhangzott előadás alapján készült.*

\*\*\*

Korunk egyik meghatározó területe a nanotechnológia, amely a műszaki funkcionális rendszerekkel molekuláris ill. atomi szinten foglalkozik. Lényege az, hogy legalább egy dimenzió mérete az 1 és 100 nanométer közötti tartományba essék, így a kvantummechanikai hatások érvényesülnek. A textil- és textilruházati szakágazat a nanoszálak közvetlen felhasználásán és az ilyen alapanyagból készült nemszőtt kelmék előállításán kívül is több helyen hasznosítja a nanométer méretű beavatkozásokat. A szálgyártások során számos nanorészecske fordul elő adalékként, több nano jellegű kikészítő eljárással tudják a textilfeleleteiket célirányosan módosítani. Különösen az egészségügy és a gyógyászat területén jelentősek az ilyen textiliák ill. termékek. Továbbá az UV-védelem területén, az öntisztuló termékek előállítása során, valamint az elektromos energia fejlesztése és tárolása kapcsán hasznosíthatók a nanotechnológia eredményei. A plazmakezeléssel kombinált különleges felületmódosító hatások (implantátumokkal elért víz- és szennytaszítás, égéskésleltetés stb.) szintén nanokörülmények között érhetők el. A nanoMOF alkalmazások pl. a védőruházatok területén jelentenek nagy előrelépést.

A nanotechnológiák felvetése az 1959. év végére tehető, amikor a Kaliforniai Tudományos Intézetben a Nobel-díjas Richard P. Feynmann az Amerikai Fizikai Társaság éves találkozóján egy technológiai elképzelést mutatott be az extrém miniaturizálásról. A dolgok kisebb skálán történő irányításának problémájára utalva, egy olyan technológiát vetített előre, amely a természet alapvető folyamataira alapul (nanoobjektumok építése atomról atomra, molekuláról molekulára). Az 1980-as

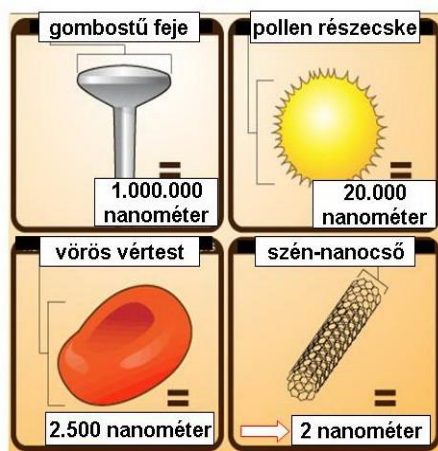
évek óta számos találmány és felfedezés megerősítette a tudós elképzeléseit.

A nano prefixum (az SI-mértékegység-rendszerben mint előtag) a görög „nanosz” kifejezésből (jelentése: törpe) származik,  $10^{-9}$  nagyságrendet jelöl. Így pl. a nanométer (nm) a méter milliárdod, azaz ezermilliomod része, a milliméter milliommódnyi része. A nanométeres tartomány többek között a molekulák méreteit jellemzi, arányait tekintve olyan, mint ahogyan az 1 cm aránylik a 10 000 km-hez, vagy egy üveggolyó a Földhöz. A nanométeres nagyságrend tehát molekuláris méreteket jelent. Pl. a cellulóz-láncmolekula monomerje mintegy 1 nm hosszú, hajszálunk 100 000 nm vastagságú (1. ábra).

A természetben több folyamatra jellemző, hogy a mikroskálától nanoskáláig játszódnak le. Többek között évmilliárdokkal ezelőtt a molekulák elkezdték önszerveződésüket olyan komplex szerkezetekbe, amelyek képesek életet fenntartani. Pl. a fotoszintézis hasznosítja a napenergiát a növény világ fenntartásához. A növényekben fénybegyűjtő molekulák találhatók, a klorofil a sejten belül a nanométertől mikrométerig terjedő skálán fordul elő. Ezek a struktúrák mintegy felfogják a fényenergiát és átalakítják olyan kémiai energiává, amely a növényi sejtek biokémiai mechanizmusát vezérli. Számos további példát lehetne sorolni a természetben fellelhető nanofolyamatok kapcsán.

A nanotechnológia körébe tartozik minden olyan eljárás, amelyet nanométeres tartományban hajtanak végre, továbbá valamennyi olyan fizikai ill. kémiai rendszer előállítása és alkalmazása, amelynek nagysága egy atom vagy molekula méretével egyező. Hasonlóan ide sorolható a képzett nanostruktúrák beépítése nagyobb rendszerbe. A nanotechnológia lényege azzal magyarázható, hogy az anyagok tulajdonságai nanométer méretű darabolás esetén (egy vagy több dimenzióban) „váratlanul” megváltoznak. A nagyobb méretű anyagdarabokhoz viszonyított markáns tulajdonságváltozások az atomok és molekulák egyedi viselkedésére vezethető vissza. A tulajdonságok vizsgálatánál általában a fizika mechanikai ágának törvényszerűségei érvényesülnek, azonban a nanométeres tartományban már a kvantummechanika kerül előtérbe (az átmenet határértéke a nanométer megjelenése). A tulajdonságváltozásra szemléletes, hogy pl. az egyébként rideg kerámiaanyagok könnyen alakíthatók nanométeres méretekből. Azonban nemcsak az ilyen részecskékből önállóan felépülő rendszereket hasznosítják, hanem adott polimerekbe juttatott nanorészecskékkal is érnek el jelentős teljesítménynyújtást.

A textil szakágazatok a nanotechnológiai kutatások eredményei közül főleg az ilyen méretű anyagok fokozott – a térfogathoz viszonyított – felületnövekedését, másrészt az egyes előnyös mechanikai tulajdonságváltozásokat (pl. a szilárdságot és merevséget növelő képességet) hasznosítják, ill. speciális felhasználási területek további elérését szorgalmazzák.



A nanotartomány jellemzése

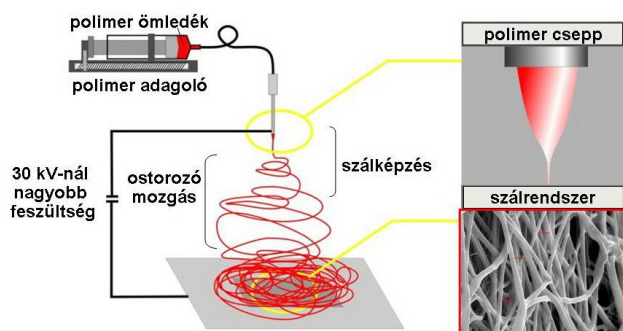
1. ábra

## A nanoszálak előállítása, tulajdonságai

A nanoszálakra az 1  $\mu\text{m}$ -nél kisebb szálátmérő és ennek általában százszorosát kitevő hosszúság jellemző. Így a nanoszálak keresztirányú mérete esetenként kisebb a látható fény hullámhosszánál, így nagy felbontóképességű fénymikroszkóppal sem elemezhetők.

A nano-szálanyagok textilszakmai hasznosítása elsősorban a mesterségesen előállított szálak vastagságának radikális csökkenésével elérhető különleges tulajdonságokkal kapcsolatos. A mesterséges szálanyagok átmérőjének mikrométeres ( $10^{-6}$  méteres) mértékegység-tartományából a nanométeres ( $10^{-9}$  méter) nagyságrendre áttérve megfigyelhető jellegzetes változások a következők:

- a szálfelület a térfogathoz képest jelentősen megnő,
- rendkívüli szilárdsági jellemzők érhetők el (a fajtól függetlenül a mikroszálakénál is nagyobb),
- a tömegükhöz képest különlegesen nagy húzóellenállást biztosító vékonyság egyúttal áttetsző szálakat eredményez,
- szerkezetükben a nagyszámú parányi pórus (néhány nanométeres méretű üregecske) különleges adottságokat kölcsönöz (pl. a levegőrészecskék- ill. vízmolekulák behatolása lehetséges, azonban a mikro-



A nanoszál elektromos térben történő előállítása

2. ábra

organizmusok nagy része nem fér be).

A szálelőállítás döntően az ún. electro-spinning (2. ábra) módszerével elektrosztatikus erőterben történik. A folyékony halmazállapotú (pl. oldott) polimerből – amelybe magas feszültségű elektróda hatol – a lassan forgó szórófej apró cseppeket választ le a kapilláris csúcsára. Az ehhez közelítő földelt gyűjtőtekercsű tű segítségével megindul a folyékony anyagáram. Az egyre közelebb kerülő ellentétes elektróda következtében a töltéssel rendelkező polimer-részecskék alkotta sugár felgyorsul, egyre vékonyodik, egyúttal ostorozó mozgása is létrejön, tovább hosszabbítja és így vékonyítja a készülő nanoszálát. A megnyúlt polimer-cseppből elpárolog az oldószer, az elektromos erőter teljesen lecsökkent a folyadék felületi feszültségét, végül a levegő megdermed a szál. A kollektoron így kialakult véges hosszúságú polimerdarabkák az oldószer teljes elpárolgatása ill. hűtés hatására teljesen megszilárdulnak, kialakulnak az 50–300 nm átmérőjű nanoszálak. Így egyelőre ún. vágott szál formájában gyárthatók csak a nanoszálak. Az electro-spinning technikával dolgozó, sűrűn egyvonalban elhelyezett szálcseppző fejek alkotják a nemszött kelmét előállító berendezést (Nanospider, azaz „nanópók” elnevezéssel ismert).

Megfelelő fibrillációval is előállíthatók nanoszálak. Pl. poliakrilnitrilből, lyocellből és folyadékkristályos polimerekből is képezhetők nanométeres vastagságú szálak, amikor a hagyományos mesterséges szálát a felépítő fibrillákra szétbontják. Az így előállított nanoszálak 50–500 nm-es szálátmérővel és 0,5–8 mm-es hosszúsággal rendelkeznek.

A mikroszálakra jellemző bikomponenses szálcseppzés is alkalmas nanoszál gyártásra. Elterjedt az ún. „sziget a tengerben” módszer. Az egyik komponens a leendő nanoszálakat („sziget”), a másik az ezeket körülvevő mátrix anyagot („tenger”) jelenti. A mátrixanyag könnyebben oldható, így eltávolítása után a megmaradó néhány száz „sziget” alkotja a nanotartományú átmérővel rendelkező szálakat. A bikomponens eljárással így előállított nanoszálakat az „islands-in-a-sea” („sziget a tengerben”) kifejezés rövidítéseként INS szálnak is nevezik, amelyek szálátmérője 300–2000 nm-ig, hosszúságuk a 0,5 mm-től a néhány centiméterig terjed.

Elterjedt az ömleszthető (termoplasztikus) polimerek olvadáskából történő nanoszálképzés is, azonban ehhez olyan furatok és csatornanyílások szükségesek a szálcseppző fejen, amelyekkel  $\mu\text{m}$ -nél kisebb szálátmérő érhető el.

Ismert az ún. dendritkristályos nanoszál képzés is, ennél a faágakhoz hasonló alakzatú kristályképződményeket a megfelelő polimer oldat szétterítésével érik el. A felületen kialakult parányi vastagságú rétegből eltávolítják az oldószert, így a polimer szál vagy film formájában lesz jelen (a nm-tartományú dendrit szálanyagként felhasználható).

## A nanorészecskék textilipari hasznosítása

A nanométerű részecskék (ezeket az angol nanoparticles kifejezésből NPs-nek is nevezik) előállítására több módszer ismert. Ilyen pl. a fémek vákuumban történő párologtatása megfelelő szerkezetű hordozóra. A zeolit-vázba beépülő részecskék méreteit a pórus- illetve a szuperüregek mérete határozza meg, amelyek a nanométeres tartományba esnek. Szonokémiai eljárással is lehetséges NPs képzés. Ennél az akusztikus kavitáció jelenségét használják fel, az ultrahangos besugárzásra buborékképződés ill. növekedés és szétrobbanás következik be. A milliónyi mikrobuborékban 20 kHz frekvencián térfogatonövekedés és nyomáscsökkenés következik be, az üregbe egyre több oldott anyag és oldószer párolog. Ilyen körülmények (10 perces ultrahang besugárzás) között pl. ezüst-nitrát vizes oldatából állíthatók elő ezüst kolloid rendszerben levő nanorészecskék (AgNPs), amelyek kötszerekben, alsóruházatokban, zoknikban stb. rögzíthetők. Az így elért baktérium- ill. gombaölő hatást sikeres kísérletek bizonyítják.

A nanométeres tartományba eső anyag-részecskéket a szálgyártás során, ill. a fonal- és kelmekikészítés területén alkalmazzák az előnyök kihasználása érdekében.

**A szálgyártás során az adalékként történő alkalmazás sokrétű.** Lényeges, hogy az átlátszó nanorészecskék nem befolyásolják a textília színét és fényét.

- A megfelelő agyag (pl. montmorillonit) nanorészecskék ill. nanolemezék hatására hő- ill. vegy-

szerálló, lángálló, UV hatásnak ellenálló, UV-blokkoló képességű és nagyobb szilárdságú lesz a poliamidszál.

- Titán-, alumínium-, cink- és magnézium-oxidokkal elektromos vezetőképességű lesz a szál. Cinkoxid nanorészecskék adagolásával olyan poliamidszál nyerhető, amely az árnyékoló szerkezeteket erő



minden egyes  
arany nanorészecske  
ezer hialuronsav  
molekulát hordoz



### Védekezés nanotechnológiás „aranyzállal” a bőr öregedése ellen

3. ábra

fokozott nap- és UV-sugárzásnak ellenáll. Titán- ill. mangánoxid nanorészecskékkel önsterilizáló képességű szál állítható elő.

- Az egyébként nehezen (alapvetően a szálképző masszában) színezhető polipropilén szálak adott nanorészecskék bevitelével (amelyek a színezék megkötéshez helyeket biztosítanak) diszperziós és savas színezékekkel színezhetővé válnak.

- A szén nanoszálakhoz kevert korom nanorészecskék fokozzák a nagyszilárdságú szálak szívósságát és kopásállóságát.

- Nanotechnológia útján speciális hatóanyaggal ellátott „aranyzállal” (3. ábra) a bőr öregedése ellen is lehet védekezni. Ennek során hialuronsav (HA) molekulák kötődnek a 24 karátos aranyrészecskéken. (Az arany és a HA mag-héj rendszert alkot; minden egyes arany nanorészecske ezer HA molekulát hordoz.) A hialuronsav egy természetes összetett szénhidrát, vízmegkötő hatása és az ízületekben síkosító képessége előnyös. Az új generációs – arany és HA hatóanyaggal ellátott – poliamidszál (Nylgold) bőrgyógyászati tulajdonságokkal rendelkezik, véd a szabad gyökök hatása ellen, amelyek bőr öregedéséért felelősek.

**A különböző kikészítő eljárások során rendkívüli előnyökkel jár a nanorészecskék felhasználása.**

- - A nanoméretű részecskék ill. akár egyes molekulák (termodinamikai, elektrosztatikai módszerrel) egyedileg, irányítottan helyezhetők el a fonalon, kelme-felületen. Nanométer méretű emulgeálással a kikészítőszer eloszlása (pl. nanokapszulákban elhelyezve) egyenletesebb lesz a textilanyagokon.

- A titán-dioxid ill. mangánoxid nanorészecskékkel vegyszerálló, biológiai hatásoknak ellenálló kelmék érhetők el (hasonlóan az aktív szénrel kezeltékhez).

- A nanokristályos piezokerámiás részecskék felvitelével olyan fonalak és textíliák készíthetők, amelyek viselőjének életfunkcióinak (pl. szívritmus) monitorozására alkalmasak (4. ábra).

- A plazmatechnológiákkal felvitt speciális kerámia jellegű bevonatokkal (pl. indium-ónoxid) a textilanyag optikai tulajdonságai célirányosan módosítha-

tók. Így a hadifelszerelések álcázása hatékonyan megoldható.

**Az önfelépítő nanorétegek textíles felhasználása is előtérbe kerül.** Az 1 nm-nél vékonyabb felületek felvitelével adott anyagok fizikai tulajdonságai célirányosan javíthatók. Többek között az elektrosztatikus feltöltődés lehetőséget ad arra, hogy a textilanyagon kialakított funkcionális bevonat önmagát is képes legyen kijavítani. A rétegfelépítés során egymás után eltérő töltéssel rendelkező bevonatokat visznek fel, így a polimerfilm igény szerint vastagítható. Az ilyen bevonatépítés rendkívül ellenőrzött folyamatokat és tökéletesen megválasztott réteganyagokat igényel. Ismert olyan önfelépítő nanorendszer is, amelynél a szintetikus szál (pl. poliészter monofilament) felületének molekuláit nanotechnológiával átrendezik, így jön létre a kívánt 10–30 nm vastagságú bevonat. Az eszerint kialakított rétegben teljesen megváltoznak a szál tömb-anyagi fizikai tulajdonságai.

### A nanotechnológia alkalmazása az egészségügyi textíliáknál és az egészségvédelemben

A nanoszálak, nanotechnológiával alakított textilképződmények egy részét az egészségügyi ill. gyógyászati területeken használják. A textíliába telepített, nanotechnológiás eljárással kialakított kapszulákkal többféle anyag adható át az emberi szervezetnek (gyógyszer, vitamin, bőrápoló stb.). Nanotechnológiás gyártással különleges képességű szűrőmembránok állíthatók elő (vér és egyéb testnedvek szűrésére). A műtőkben nanoszálak légszűrők, maszkok (antivirális hatású ezüst adalékokkal is) előnyösen alkalmazhatók.

A nanoszálak összességének viszonylagosan rendkívül nagy felülete alkalmas fontos vegyületek optimális elhelyezésére. Pl. a kötszerekben jelenlevő ellenanyagok a rabul ejtett baktériumokkal rögtön végeznek, ill. a sebgyógyulást segítő készítmények vérzéscsillító és hámosodást serkentő hatása érvényesül. A kórokozók elleni védelemre is hatékonyan használhatók a nanokelmékből készült kendők, maszkok (pl. a madárinfluenza fertőzésre képes elemei is így tökéletesen elfoghatók). A plazmakezeléssel készített bioanyagokkal olyan hatások érhetők el, amelyekkel a textília bioaktivitása változtatható (fokozható vagy mérsékelhető), pl. kötszerek, vértároló tasakok, speciális tapasztok, stb. készíthetők.

A nanotechnológiával speciális kelmék állíthatók elő implantátumok, katéterek, műerek, egyéb sebészeti



Példa testfunkciókat monitorozó ruházatra

4. ábra



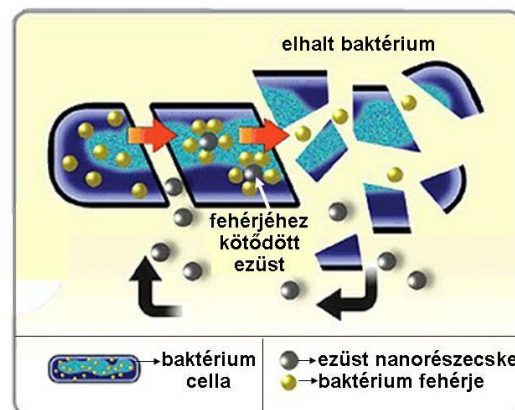
eszközök stb. céljára. A vékony emberi szövetek alapvázának kialakításához nanoszálás textilfelületek előnyök (erre tenyésztik „in vitro” a sejteket, pl. szervátültetéshez).

A gyógyászat és az egészségvédelem területén a már említett testfunkciók megfigyelésére is lehetőség nyílik. Az alkalmas speciális textilanyagokkal (nanotechnológiás szenzor-szálak stb.) távdiagnosztikára, folyamatos kontrollra van mód.

A légmagos fotonikus kristályszállal pl. a műtét nélküli helyi daganatgyógyításra nyílik lehetőség. A fotonikus kristályok olyan periodikus térbeli szerkezetek, amelyeknek 1, 2 vagy 3 dimenzióban ismétlődő elemi cellamérete a mikrométeres tartomány alá esik. Az ilyen kristályszerű szerkezetekben a fényhullám ahhoz hasonlóan viselkedik, mint az elektronhullámok az atomi periódusú kristályokban. Az ún. légmagos fotonikus kristály szál (photonic bandgap = PBG szál) speciális optikai szál. Üregének beléje egydimenziós, nagy visszaverő képességű, többrétegű struktúra (a fényt eljuttatja ebben a légtérben terjed). A rugalmas szál képes a nagyteljesítményű infravörös lézersugárakat akadálytalanul szállítani a különböző testüregekbe, ahol a beavatkozásra szükség van.

A nanotechnológiával kialakított intelligens harisnyát egyelőre az úrhajósoknál alkalmazzák. Az emberi hajszálnál is vékonyabb, elektromosan vezető huzal voltaképpen egy speciális felépítésű szálképződmény. A fonál belseje egy 40 µm vastag rézszál, ezt 0,8 µm vastag ezüstréteg borítja és kívül még egy néhány mikrométer vastagságú poliészter bevonat is van. A harisnyába telepített szenzorok és az EMG műszer fontos feladatokat látnak el. (Az electromyographiás – EMG – műszer a vázizmok – akaratlagosan szabályozható működésű izmok – ún. motoros egységeinek működéséről ad felvilágosítást.) Az intelligens harisnya információkat szolgáltat a földi irányításnak a vér oxigénszintjéről, az izmok állapotáról, és kijelzők segítségével a viselt zokni világít, ha valamilyen rendellenesség áll fenn.

A különleges szálanyagok ill. kelmék fontos képviselői a fémezett textiliák. Az ilyen textilanyagok előállításakor először a mikroszál felületét plazmakezeléssel nanoérdesítéssel teszik alkalmassá a fémréteg befogadására. Ezután a fém aktiválásával megkezdődik a fémionok kémiai felvitele a szál aktív csoportjaira, azaz kialakul a „szál-fém” határfelület. Végül az így kialakított



A nanoezüst baktériumölő hatása

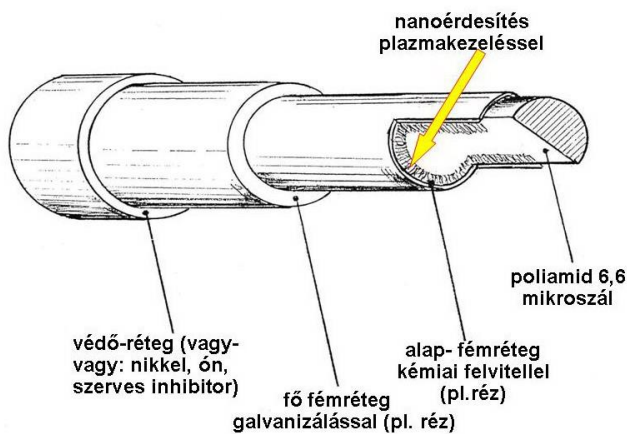
6. ábra

alaprétegre a galvanizáló fürdőből elektrolízissel kiválasztják a fő réteget képező fémbevonatot, ill. a szükséges védőréteget (5. ábra). Az önsterilizáló ezüst hatóanyagú szálanyagok hatásossága, antibakteriális képessége egyrészt a pozitív fémionok és a mikroorganizmusok negatív-töltésű membránja közötti kapcsolattal magyarázható, másrészt a baktériumsejt falának mélyedéseiben felhalmozódó ezüstrészecskék teszik tönkre mikroorganizmusokat (6. ábra). Felmerül az is, hogy a kórokozók membránja fehérjéit felépítő kén tartalmú aminosavakból az ezüst ként von el, a sejtmembrán áteresztő képességének megváltozása vezet a pusztuláshoz. Ennek megfelelően gyógyszeres kezelés nélkül gyógyulhatnak a neurodermitiszes elváltozások (veleszületett túlérzékenységek, pl. ekcémák formájában stb.). Alkalmaznak ezüstbevonatú poliamid textiliákat kötött kivitelben alsóruházatnak ill. szövött cikketek ágyneműkhöz (matrac, huzat stb.) ekcémás, gombás, egyéb kórokozók által kialakult bőrbetegségek leküzdésére. Az egyéb fémbevonatú szálakból készült textilfelületek az elektroszög árnyékolásával javítják a környezeti körülményeket. A rezeztett textiliákkal ízületi bántalmak is kezelhetők. A réz katalizálja az ún. SOD (superoxide dismutase) enzim működését, így többek között az ízületi gyulladásos megbetegedések gyógyszermentes kezelésére hatékony módszer kínálkozik (a beteg testfelületre helyezett rezeztett textilanyaggal). Hasonlóan előnyösen alkalmazhatók a textil-réz termékek görcsök (pl. különböző eredetű fejfájások) megszüntetésére, a krónikus mozgásszervi problémák (pl. meszesedés eredetű gerinc- és ízületi problémák, reumatikus elváltozások, törések, rándulások utáni állapot, izomkötöttség stb.) okozta kellemetlenségek felszámolására.

## Nanoszálak és nanotechnológiás textiliák egyéb hasznosítása

Az egészségügyi alkalmazásokon kívül számos egyéb területen is hasznosítják a nanotextiliákat.

Szerkezeterősítő és építőanyagként egyaránt alkalmazhatók. A nanocsövek olyan, nagyon parányi (nanométer méretű, belül üres, henger alakú) anyagszerkezetek, amelyek falát azonos, vagy különböző, egymással kovalens kötással összekapcsolódó atomok alkotják. A néhány nanométeres belső átmérőjükhöz képest hosszuk több tíz- vagy százezerszer is nagyobb lehet. A szén nanocső egyetlen atom vastagságú speciális grafitréteg (grafén) „csővé tekerve” (7. ábra). Alapul a



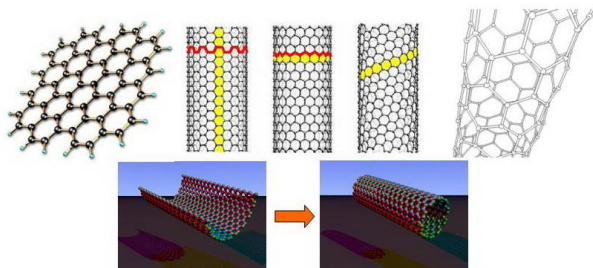
A fémezett szál felépítése

5. ábra

szénatomokból álló, atomnyi vastagságú egyetlen grafít réteg (a szénatomok kétdimenziós méhsejtrácsa) szolgál. A nanocsövek a szén nanoszálaknál erősebbek és elektromos vezetőképességük is jobb. Szakító igénybevétellel szembeni ellenállásuk százszorosa az acélénak, ugyanakkor tömegük hatodrésznyi. Az elektromosságot

kus membránként működik, így az egészséget veszélyeztető gázokat oxidációval ártalmatlanítja. A triklóretilénnel szennyezett vizeknél kárenyhítési módszerként is alkalmazzák.

A részleges fényelnyelésre képes színes vegyületek nélküli színes felületek elérése a lepkék szárnyainak



A szén nanocsövek elvi felépítése

7. ábra

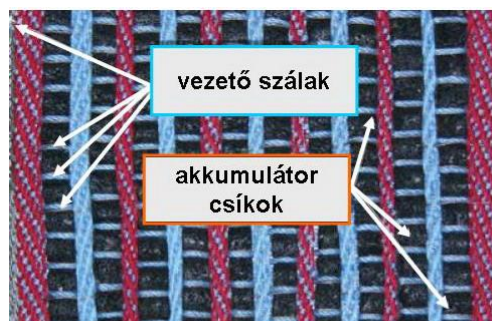
a rézzel egyenértékűen vezetnek, sőt fajlagosan nagyobb áramerősség továbbítására képesek. A szén nanocsövek különleges elektromos, mechanikai és kémiai tulajdonságai számos egyedi alkalmazási lehetőséget teremtenek (nagy szilárdságú elektromos vezetőképes szálak, emissziós képernyők, elektromágneses árnyékolók).

A szén nanocsövekkel erősített polivinilalkohol szál nagy merevségű és az acélnál húszszor, a ballisztikai védelmet nyújtó aramidszálal tizenhatszor szívósabb. Így a robbanás repeszhatásaitól védő takarók, extra biztonságú hevederek készítésére használják.

A textíliába beépített áramfejlesztő nanogenerátorok ruházatban (viseléssel járó mozgások), sátorlapban (légmozgások, vibráció) előnyösen alkalmazhatók. A páronként összecsoportosított, parányi sörtéhez hasonló képződmények egyedi felépítésűek. A sörtét „kevlar-kocsányból” álló rostok alkotják, minden roston 30–50 nanométer méretű nanodrótnek nevezett kristály található. A rostpár egyike aranybevonatú, a két különböző rost összedörzsölődése elektromos energiát termel (piezoelektromos- ill. mechanikai hatásra áram generálódik). Az 1 cm-es rostok összedörzsölődésével 4 nA áramerősség, 4 mV feszültség nyerhető, 1 m<sup>2</sup>-es textílfelülettel 80 mW teljesítmény állítható elő. A nanotechnológiával képzett textilanyagú villamosenergia-tároló szintén ismert. A rugalmas elem lítium-titán anóddal és lítium-vasfoszfát katóddal készül, a vezető szállal szőtt szövet köti össze az elemek sorozatát (ezek nem igényelnek folyékony elektrolitot) (8. ábra). Az így kombinált textiltermék a beépített energiatárolóval ellenáll a viselési és kezelési igénybevételeknek.

A nanotechnológiával polimerfilm alakban előállított napelemek is beépíthetők textiltermékekbe (pl. nyakkendő, fürdőruha stb.) Ezek olyan szilárdtest eszközök, amelyek a fénysugárzás energiáját közvetlenül villamos energiává alakítják. Az energiaátalakítás lényege, hogy a fény elnyelődésekor mozgásképes töltött részecskéket generál. Az így nyert árammal mobiltelefon, MP3 lejátszó stb. egyaránt táplálható.

A kelmefelületen kialakított 5–10 nm-es palládium nanorészecskékkel olyan bevonat képezhető, amely a káros légköri gázoktól (amelyek a szmogban feldúsulnak) védi viselőjét. A könnyű-platinafémek csoportjába tartozó palládium nanométerű előfordulással kataliti-



Nanoszálak felhasználásával készített elektromos-energia tároló

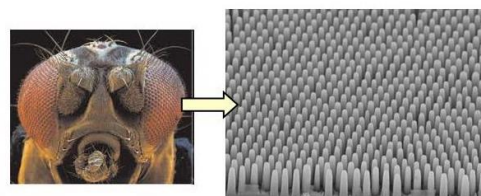
8. ábra



a lepkésárny nano felépítése

Színezék nélküli színes felületek nanostruktúrával

9. ábra



antireflektív és öntisztuló nanoréteg

Az éjjeli lepkék szemfelületét utánozó bevonat

10. ábra

nanométer tartományú tanulmányozása alapján vált elérhetővé (9. ábra). Az egyedi adottságokkal rendelkező, nanostruktúrájú felületek különleges optikai hatást mutatnak, így színezékek nélkül is színes vizuális élményt kölcsönöznek. Ennek átvételével pl. fénnyel, egyéb károsító körülményekkel szemben ellenálló textílfelületek nyerhetők, amelyeknél a színhatás független az egyébként jellemző vegyületek összetételétől és részecskeméretétől.

Az éjjeli lepkék szemének külső szerkezetét adaptálva öntisztuló és antireflektív bevonatok képezhetők a textílfelületeken (10. ábra).

A nanoszálak és a belőlük készült szerkezetek hangszigetelésre is alkalmasak, mert a hanghullámok munkavégző képességét hőenergiává alakítják (a nanométerű üregek rezonáló membránként működnek közre).



## Nanotechnológiával előállított textiltermékek

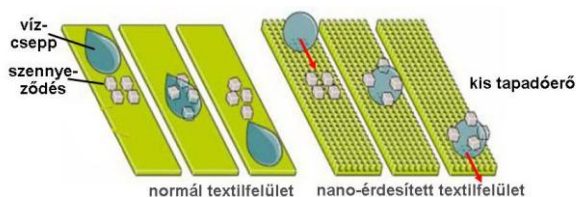
A nanotechnológiás textil- és ruházati termékekkel szembeni elvárások:

- egyik dimenziójában legfeljebb 100 nm-es méretű szál, anyagrészecske, felületalakítás,
- az emberi bőrrel érintkező nanorészecskés termékek egészségkárosító kockázata teljesen kizárt legyen, egyéb ilyen cikkekből a használat során leváló hatóanyagok ne szennyezzék a környezetet,



Az öntisztuló textilfelület felépítése

11. ábra



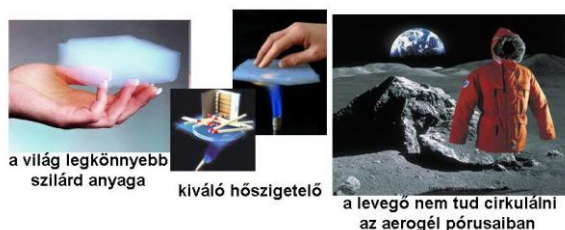
A lótosz-effektus lényege és elérése nanokezeléssel

12. ábra



Hatékony UV-védelem titán- ill. cinkoxid nanorészecskés bevonattal

13. ábra



Aerogéllal kombinált űrhajós ruházat

14. ábra

- optimális feldolgozhatóság (szabhatóság, varrhatóság, egyéb idom-összeilleszthetőség stb.),
- megfelelő használati tulajdonságok (pl. kopással, húzással, hajlítással stb. szembeni ellenállás),
- ruházatnál megfelelő fiziológiai jellemzők (légáteresztés, vízgőztranszport, bőrbarát jelleg stb.) garantálása,
- a nyersanyag-összetételhez és a rendeltetéshez igazodó kezelhetőség (háztartási és nagyüzemi mosás, vegytisztítás, igény szerint professzionális „biotisztítás”),
- az elvárt életciklus megbízható teljesülése (használat, kezelés, gondozás figyelembevételével),
- az életciklus végén környezetkímélő elhelyezés, ártalmatlanítás,
- jogi szabályozású cikkeknel (pl. védőruházat, textilalapú védőeszköz; textilanyagból készült játékok) a vonatkozó jogi rendelkezések, harmonizált szabványok szerinti megfelelés elérése.

A sokrétű alkalmazás közül kiemelendők az öntisztuló textiliák, amelyek optimális nano bevonattal érhetőek el. A 100 nm-nél kisebb átmérőjű nanorészecskéket mélyen beágyazzák a hordozó mátrixba, a különleges kötőanyag biztosítja a bevonat tartósságát a textília felületén. Az egyedi réteg hatásaként a vízcsepp mindössze 2–3 %-a érintkezik a textilanyaggal, az ilyen képességű napernyők, vitorlák, sátrak, zászlók és akár munkaruha-anyagok öntisztulóvá válnak (11. ábra). A megoldás a természet ihlette öntisztító képességre (lótusz-effektus) vezethető vissza. A felületre jellemző „nanorücskösség” miatt a szennyeződések nem képesen tartósan kötődni (12. ábra).

Nanotechnológiával UV-védelmet biztosító textiltermékek is előállíthatók. A nanoméretű (pl. 10–50 nm-es) titándioxid ill. cinkoxid textilanyagra történő tartós felvitelével (pl. szol-gél állapotban) a káros UV-sugárzás hatékonyan elnyelődik, szétszóródik. Az így kezelt textiltermék az UV-Standard-801 szerint kiváló UPF faktoros tanúsítvánnyal rendelkezik (13. ábra).

Az aerogéllal kombinált űrhajós ruházat várhatóan a hideg ellen védő ruházatok területén is elterjed. Az aerogélek szilárd vázát kerámia, polimer vagy hibrid-anyagok adják, a közbezárt nanopórusokat levegő tölti ki. Rendkívül nagy porozitásuk miatt a világ legkönnyebb szilárd anyagai, a pórusok átmérője 1–100 nm között van [a hétköznapi pórusos anyagok üregei mm vagy mm méretűek]. A „megszilárdult füst” elnevezéssel illetett aerogél nagyon kis sűrűségű (1,9 mg/cm<sup>3</sup>), átlátszó. A levegő nem tud cirkulálni az aerogél pórusrendszerében, így a hőátadás egyik formája (hővezetés, hőáramlás, hőszugárzás) sem érvényesül. A kiváló szigetelőképessegre jellemző, hogy pl. egy 18 mm vastagságú szilika aerogél réteg a Mars –130 °C-os hidegétől is megvédené (14. ábra).

A megfelelő szerkezetű nemszőtt textiliába beágyazott szenzorszálok ill. hálórendszer folyamatos paraméterkövetést tesz lehetővé adott építményben. A beépített optikai szálok, nanokristályos piezoérzékelő szálok képesek a jeladást. Így az adott szerkezet deformációja, nyomási terhelése, hőmérséklete, strukturális rétegeztsége, vízszinthez viszonyított helyzete, az építmény alatti vízösszetétel stb. folyamatosan vizsgálható. Ennek felhasználásával utak, vasúti pályák alatt, építmények szerkezeti részeiben ill. falazatában bekövetkező változások követhetők. A beépített textilrendszer a strukturális

szerkezet megerősítését is szolgálja és hajlékonyságát is növeli.

## Textilipari plazmakezelések

A plazmatérben kezelt szálanyag felületének kedvező átalakítása, az aktivált gázrészecskék közvetítésével előidézett kémiai módosítások (új funkciós csoportok tökéletes implantációja), a szerves szennyeződéseket eltávolító ill. tisztító hatások mind olyan nanokezelési lehetőségek, amelyek újszerű fejezeteket nyitottak a szálanyagok feldolgozása, kikészítése területén. Ezzel együtt a rendeltetési céloknak optimálisan megfelelő textiltermékek előállítása környezetkímélő módon, humánökológiailag megfelelően, valamint energetikaképesen történhet.

A plazmakezeléssel előkészített textilanyagok könnyebben és hatékonyabban színezhetők, nyomhatók, speciális végkikészítésük (pl. lángolásgátlás, olaj- és szennytaszító képesség elérése stb.) kisebb segédanyag igényteliséggel és tökéletes eredménnyel hajtható végre. A hidrofób szálaknál hidrofilitás érhető el, a jól nedvesedő természetes szálaknál fokozható és gyorsítható a vízfelvétel. Agresszív vegyi kezelések nélkül elérhető a gyapjú nemzelődésmentesítése. A főként műszaki textil rendeltetésű szerkezeteknél (bevonatos ill. laminált termékek, szálerezősítésű összetett anyagok stb.) a plazmabehatásra lényegesen fokozódik a különböző összetevők közötti megkötődés, jelentősen növekszik a tapadóképeség. A textiltermékek sterilizálását szintén tökéletesen megoldja a plazmatérben végzett kezelés. Így vegyi anyagok és magas hőmérséklet nélkül csíramentesíthetők, pl. az egészségügyben használatos textiliák.

A számos előny ellenére egyelőre aránylag kismértékű a plazmatechnológia iránti textilipari érdeklődés, ami a plazmakezelő berendezés magas beruházási költségével függ össze (bérmunkában végeztetett kezelés esetén viszont messze nem számít költségesnek). A szakaszos megoldások mellett napjainkban megjelentek a folyamatos plazmakezelésre is alkalmas kelmekikészítő-berendezések is. Nemcsak számos kutatóintézetben üzemel atmoszférikus körülmények között működtethető folyamatos textilkezelő plazmaberendezés, hanem kontinensünkön is több ilyen adottságú ipari bérmunkacentrum igénybevitelére van lehetőség.

A konfekcionált darabáruk plazmakezelésére is van mód. Az egyik szakaszos plazmakezelési technológiai eljárás pl. az elkészült ruházati termékek víztaszítását oldja meg. Eredetileg katonai egyenruhák politetrafluoretilénes (teflonozásos), plazmatérben végrehajtott aktiválásával kezdődtek az ilyen irányú fejlesztések. A kész öltözeteket helyezik a plazma-kamrába, a kezelés nemcsak a klasszikus kelmék víztaszító bevonattal történő ellátását eredményezi, hanem az egyéb részek és kellékanyagok (varratok, húzó- és tépőzárak, egyéb záródási kellékek stb.) hatékony hidrofobizálása is vele jár. Ezzel egy sor olyan alkalmazási terület vált elérhetővé, amelyekenél korábban objektív okok (kémiai összeférhetetlenség, termék bomlás okozta károsodás) miatt nem lehetett a bevonatképzést megoldani.

Ismét hangsúlyozandó, hogy a plazmaeljárással kizárólag az anyag felületmódosításra kerül sor (néhány nm-es vastagságú rétegek képzésével ill. ilyen mélységű felszín megváltoztatással), a textilanyag egyéb tulajdonságai változatlanok maradnak. Ennek megfelelően a plazmatérben jelenlévő reaktív részecskék vagy megvál-

toztatják a felszínt, vagy polimerizálódva igen vékony filmréteget alakítanak ki.

## A nanoporozus fém-organikus vegyületek védőruházati alkalmazása

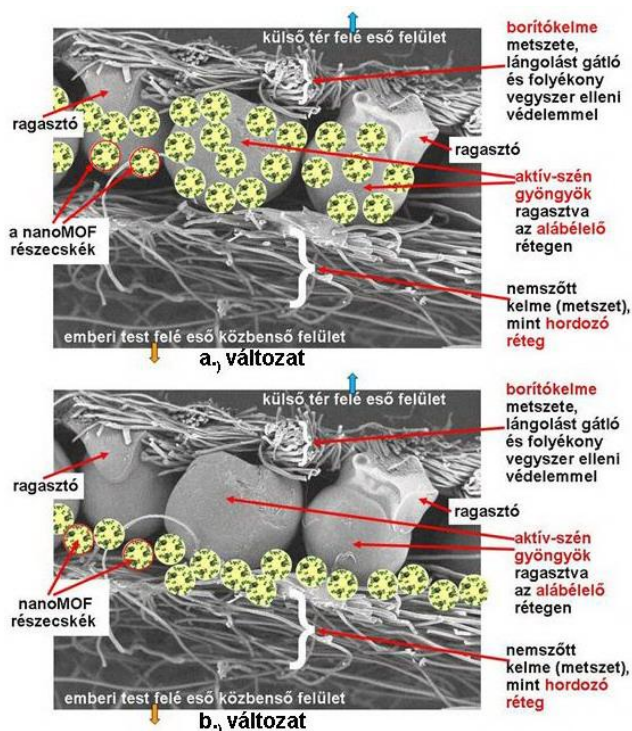
Az önálló vegyületcsoportot alkotó fémoxid-vázak, fém-organikus anyagok MOF (Metal-Organic Framework) elnevezéssel ismertek a szakirodalomban. Ezek a kristályos felépítésű „szervetlen-szerves” vázszervezetek két összehangolt egységből épülnek fel. Az egyik összetevő a fém, amely ion vagy klaszter fémion formájában van jelen. A másik felépítő rész általában merev, multifunkcionális szerves láncmolekulákból áll.

A szervetlen göbökből és az alkalmas szerves láncmolekulákból kialakított nagy porozitású hibridek előállításával különleges teljesítményjellemzőkkel rendelkező vegyületek nyerhetők. A természetes eredetű porózus anyagok (pl. zeolitok, aktív szén stb.) tanulmányozásával fejlődtek ki a MOF vegyületek. A hagyományos zeolit-csoport ásványai molekulárisan kötött vizüket hevítés hatására elvesztik (dehidratáció), a képződő mikrométer ( $10^{-6}$  m) nagyságrendű üregek molekulaszűrőként működnek. A jellemző méret fölötti molekulákat visszatartják. A megkötött ionok helyett a folyadékokba más ionokat juttatnak igény szerint (ioncserélődés). Tehát a természetes porózus anyagok szűrőteljesítménye a jelzett mérettartományban hatásos. Az aktív szén nagy adszorpcióképeségű szén módosulat, amelyet fizikai reaktiválás útján 600–900 °C-on végrehajtott hőkezeléssel (karbonizálás) vagy oxidációs aktiválással (600–1200 °C-on szénmonoxiddal, oxigénnel, vízgőzzel) állítanak elő. A kémiai módszerű előállításnál a stabilizált szenet 450–900 °C-on továbbszéneseztik, így rövidebb idő alatt és kevesebb energiával képezhető aktív szén. Az így nyert szénváltozat rendkívül nagy fajlagos felülettel rendelkezik (1 g aktív szén teljes felülete meghaladja az 500 m<sup>2</sup>-t), így a nagy porozitású szilárd anyag gázok, gőzök és folyadékok megkötésére kiválóan alkalmas. Az alkalmas nemcsak kelméken kialakított, parányi méretű aktív szén-gyöngyökből képzett szűrőrétegeket már régóta használják, azonban egyéb, pl. nagy gázmegkötő kapacitású nanoanyagok felvitelére még nem került sor.

A szintetikus fémorganikus vegyületek egyik jellemző rézalapú képviselője oktaéderes kristályos szerkezetű. Az ebben előforduló pórusok 9,8 Å átmérőjűek<sup>\*)</sup>. Egyes MOF anyagokból 1 gramm tömegnyi mintegy négy kockacukornyi térfogatot tesz ki, ezt „kiterítve” 5 ezer m<sup>2</sup>-nyi aktív felület nyerhető. A nanostrukturált anyagok felhasználási területe széleskörű. Főként a fejlett, nagyteljesítményű, szelektív adszorpciót biztosító gáz szűrőrendszerekben kerül előtérbe a MOF alkalmazása.

Az egészséget károsító gázok elleni hatásos védekezés jelenleg csak a teljes emberi testet légmentesen befedő öltözetekkel valósítható meg, amely tökéletesen körbezárja viselőjét, azaz teljesen elszigeteli a külvilágtól (ezek az ún. gáztömör védőruhák). A veszélyeztetésben tevékenykedő, ilyen védőruházatokat viselő műszaki mentő- és karbantartó szakemberek munkavégzését jelentősen nehezíti a ruházatfiziológiai komfort hiánya. Többek között ennek megoldását célozza az a

<sup>\*)</sup> Å az angström jele, értéke a méter tízmilliárdod része, vagyis  $10^{-10}$  m. (Nem SI mértékegység.)



**A nanoMOF részecskék elhelyezkedési lehetőségei az összetett szerkezetben**

15. ábra

projekt, amelyet a Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS) vezetésével létrejött, 13 partnerrel működő konzorcium hajt végre. (A konzorcium egyik tagja a hazai INNOVATEX Zrt.)

A NanoMOF projekt szerinti textilipari fejlesztés arra irányul, hogy a nanoMOF aktív réteggel ellátott kelmekombinációval a veszélyes gázok (kénhidrogén, ammónia, ciklohexán) ellen is védő öltözékek és kiegészítők legyenek kialakíthatók. Emellett a mechanikai behatásoknak, folyékony vegyszerekkel szemben ellenálló (ezeket lepergető), lángolást gátló, és később feltehetően egyéb képességű (biológiai, radiológiai és nukleáris) bevetési védőruházatok (fejvédővel, maszkkal, védőkesztyűvel) kifejlesztése is célkitűzés. Tehát ún. CBRN (chemical, biological, radiological, nuclear) védőöltözék létrehozása is valószínűleg napirendre kerül.

A kifejlesztésre kerülő ruházat megfelelő nyersanyag-összetételű külső borítókelmén speciális kikészítésekkel érik el a megfelelő védőképességet (pl. lángolásgátlás, folyékony vegyszerek lepergetése stb.), természetesen a mosásállókivitel is megoldva. A lényeg az, hogy a külső borítószövet hézagait (a textilfelületet felépítő fonalak közötti szabad részeket) a védelmi képességeket biztosító segédanyagok nem tölthetik ki, így többek között a légáteresztés biztosított a borítókélme esetében. Az ez alatt elhelyezkedő szálbunda alapú nemszőtt kelmén foglal helyet a gázszűrő képes réteg, amelyet előzőleg parányi aktív-szén-gyöngyökkel láttak el. A szengolyócskákon vagy ezek között lesznek jelen a nanoMOF részecskék, amelyek az említett veszélyes gázok (kénhidrogén, ammónia, ciklohexán) adszorpciós szűrését ellátják (15. ábra). A védőruházat legbelső rétege egy ruházatfiziológiailag optimális anyagú és kialakítású bélés-kelme.

## A nanotechnológiával előállított textiltermékek fogadtatása

A számos előnyös alkalmazás, új területeken való megjelenés egyelőre nem váltott ki egyértelműen megelégedést. Vannak társadalmi rétegek (tudósok, környezetvédők, egészségügyi szakemberek), akik a génmódosított növények élelmiszerekben történő megjelenéséhez hasonlítják a nanotextiliákat. Nézetük szerint a természettel, anyagokkal nem lehet határtalanul bánni, mert a következmények még nem kellően ismertek, azaz beláthatatlanok. Utalnak pl. az aranyra, amely normál megjelenésében kémiai ellenálló és jellegzetes színű, nanoméretben vegyileg aktív és rubinvörös. A hétköznapi anyagok részecskéi több ezer vagy millió atomból állnak, a nano előfordulásban néhány tucat atomról van szó. Az atom és molekula méretű beavatkozások tulajdonságváltozásokban megnyilvánuló hatásai esetenként kiszámíthatatlanok lehetnek.

Az aggodalmaskodók a nano alkalmazásokat ismeretlen tudományág termékeinek tartják. Hiányolják a kapcsolatos kutatások, gyártások és forgalmazások szabályait, az ellenőrzés követelmény rendszerét. Szerintük a nanotechnológiák során a gyártásban közreműködő személyek által belélegzett nanorészecskék egészségkárosító hatásúak. A szennyvízbe, levegőbe kerülő nano méretű hulladékok szintén veszélyesek (a szennyvíztelepek a nanorészecskék kiválasztására nem képesek; az ipari légszűrőknél nem ügyelnek a parányi részecskék visszatartására). A használat során letöredező nanoszálak a háztartások légterét, szennyvizét szintén láthatatlanul terhelik. A nanotechnológiákat ellenzők az eljárások magas költségeit is ostromozzák (pl. a szmog ellen védő textil a egyelőre akár 10 ezer dollár/m<sup>2</sup> is lehet). A zöldmozgalmak a nanotextiliák életciklus végi megsemmisítési ill. ártalmatlanítási problémáját, megoldatlanságát szintén kritikusan felvetik.

Az önkéntes tanúsításon alapuló Globális Ökológiai Textil Standard (Global Organic Textiles Standard) megkülönböztető minőségi jeles termékeknél – a számos környezetkímélő kritérium mellett – a nanorészecskék tilalma is követelmény (16. ábra).

A mérsékeltbben gondolkodók elismerik, hogy felmerülhetnek váratlan veszélyek, ugyanakkor a potenciális előnyök olyan nagyok, hogy feltétlenül indokolt a vonatkozó K+F+I (kutatás+fejlesztés+innováció) tevékenység eredményes folytatása megfelelő kontroll mellett.



A GOTS tanúsítású textiltermékeknek tilos a funkcionális nanorészecskék előfordulása

16. ábra

## Felhasznált irodalom

- [1] Textilipari Műszaki és Tudományos Egyesület: A magyar textil- és ruhaipar kutatás-fejlesztési és innovációs stratégiája, 2009.
- [2] Kis-Csitári Judit: Antibakteriális textiliák előállítása ezüst nanorészecskék felhasználásával, Magyar Textiltechnika, 2010/1.
- [3] Nanotechnológiás textil- és ruházati termékeket fejlesztők és gyártók prospektusai.