

Nanokompozitok

Hernádi, Klára, Szegedi Tudományegyetem <hernadi@chem.u-szeged.hu>
Kónya, Zoltán, Szegedi Tudományegyetem <konya@chem.u-szeged.hu>

Nanokompozitok

írta Hernádi, Klára és Kónya, Zoltán

Publication date utolsó módosítás: 2012. december. 20.

Szerzői jog © 2012

TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1 MSc Tananyagfejlesztés

Interdiszciplináris és komplex megközelítésű digitális tananyagfejlesztés a természettudományi képzési terület mesterszakjaihoz

Tartalom

Előszó	viii
1. A tömbi anyagok rugalmassági tulajdonságai	1
1. Bevezetés	1
2. Az ideális deformálható testek rugalmassági tulajdonságai	1
3. A szakítóvizsgálat és a szakítódiagram	2
4. Képlékeny anyagok	4
5. Rideg anyagok	4
6. A törés jelensége	5
7. Viszkoelaszticitás	5
8. Gumirugalmasság	6
9. A kompozitok mechanikai tulajdonságai	7
10. Ellenőrző kérdések	8
2. A kompozitok általános jellemzése	9
1. Bevezetés	9
2. A kompozitok csoportosítási lehetőségei	9
3. Szemcsés kompozitok	10
4. Szálas (szálerősítésű) kompozitok	10
5. Lemezes kompozitok	12
6. A mátrix anyaga	12
7. A kompozitokat érő terhelések	14
8. Ellenőrző kérdések	14
3. A nanotechnológia és a nanoanyagok áttekintése	16
1. Bevezetés	16
2. Vizsgálati módszerek a nanotartományban	17
3. Szintetizálási módszerek	18
4. A kvantumpöttyök	19
5. Ellenőrző kérdések	20
4. A nanokompozitok általános jellemzése	22
1. Bevezetés	22
2. Polimermátrixú nanokompozitok	23
3. Fémmátrixú nanokompozitok	24
4. Kerámiamátrixú nanokompozitok	25
5. Ellenőrző kérdések	26
5. A nanokompozitok előállítása 1	27
1. A polimermátrixú nanokompozitok előállítása	27
2. Kémiai, fizikai módszerek a szén nanocsövek polimermátrixban történő eloszlására	29
3. Kétdimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok	31
4. Felhasznált irodalom	31
5. Ellenőrző kérdések	31
6. A nanokompozitok előállítása 2	33
1. Fémmátrixú nanokompozitok előállítása	33
2. Kerámiamátrixú nanokompozitok előállítása – réteges nanokompozitok	33
3. Bevonatok	34
4. Felhasznált irodalom	37
5. Ellenőrző kérdések	37
7. A nanokompozitok jellemzése és tulajdonságai 1	38
1. A vizsgálati eljárások főbb területei	38
2. A szerkezeti anyagok viselkedése az igénybevételekkel szemben	38
3. Termoanalitikai módszerek	39
4. Mikroszkópia	39
5. Felhasznált irodalom	42
6. Ellenőrző kérdések	42
8. A nanokompozitok jellemzése és tulajdonságai 2	43
1. Energiadiszipatív röntgenspektroszkópia (EDS)	43
2. Pásztázó szondás mikroszkópok	43
3. Egyéb vizsgálati módszerek	45

4. A nanokompozitok mechanikai tulajdonságai	45
5. A kerámiamátrixú kompozitok tulajdonságai	45
6. Bevonatok	46
7. Egyéb tulajdonságok	46
8. Felhasznált irodalom	47
9. Ellenőrző kérdések	48
9. Szén nanocsövet tartalmazó nanokompozitok	49
1. A szénszálak és a szén nanocsövek általános jellemzése	49
2. A szén nanocsövek tulajdonságai és alkalmazása	49
3. A kompozitok és előállításuk	50
4. A transzmissziós és a pásztázó elektronmikroszkóp felépítése	50
5. Felhasznált irodalom	53
6. Ellenőrző kérdések	53
10. A nanokompozitok alkalmazásai 1	54
1. Az előállított kompozitok felhasználása, jelenlegi feladatok és projektek	54
2. Felhasználási és alkalmazástechnológiai területek	54
3. Szervetlen pigment-nanokompozitok fejlesztése festékipari alkalmazások céljára	54
4. Nanokompozit bevonatok	55
5. Nanoelektronika és nanooptika	55
6. Szenzorok	55
7. Nanotechnológia a borászatban	57
8. Piaci helyzet	57
9. Nanotechnológia az orvoslásban	57
10. Nanokompozitok a repülésben	58
11. Nanokompozitok az energiatárolásban	58
12. Felhasznált irodalom	59
13. Ellenőrző kérdések	59
11. A nanokompozitok alkalmazásai 2	60
1. Nanokompozitok a biomimetikában	60
2. Nanokompozitok az építőiparban	62
3. Felhasznált irodalom	64
4. Ellenőrző kérdések	64
12. A nanokompozitok alkalmazásai 3	66
1. Forma-1	66
2. Tenisz, horgászat	67
3. Futócipők, egyéb sportok	68
4. Felhasznált irodalom	70
5. Ellenőrző kérdések	70

Az ábrák listája

1.1. A merev testet érő erőhatások csoportosítása	1
1.2. Nyírás	1
1.3. Kompresszió	1
1.4. A szakítódigram nevezetes tartományai és pontjai	2
1.5. A különböző anyagcsoportok jellemző Young-modulusa	3
1.6. A szerkezeti acél szakítódigramja	4
1.7. A folyáshatár grafikus definíciója	4
1.8. Rideg anyagok szakítódigramja	4
1.9. Rideg törés üvegben	5
1.10. Alumínium forgattyúskar fáradásos törése	5
1.11. Tengelyirányú feszültségnek kitett mintadarab képlékeny szakadása.	5
1.12. A képlékeny törés lépéseinek sematikus ábrázolása (csak tengelyirányú feszültség esetén.)	5
1.13. A relatív megnyúlás (a) időfüggése viszkoelasztikus anyagban állandó mechanikai feszültség mellett (kúszás).	6
1.14. A Kelvin–Voigt-modell	6
1.15. A relatív megnyúlás (a) és a keletkező mechanikai feszültség (b) időfüggése viszkoelasztikus anyagban (feszültségrelaxáció).	6
1.16. A Maxwell-modell.	6
1.17. Hiszterézis ciklikus alakváltozásnál.	6
1.18. A kompozitok eredő mechanikai tulajdonságai.	7
2.1. A kompozitok csoportosítása	9
2.2. A kompozitok fajtái	9
2.3. Alumínium fémhab előállítása	10
2.4. Szálerősítésű kompozit szakítódigramja	11
2.5. Mikrorepedés szálerősítésű kompozitban	11
2.6. A kompozitok csoportosítása	11
2.7. Kompozitgyártás olvasztásos módszerrel	11
2.8. Lemezes kompozitok	12
2.9. Szálcsevélés	14
2.10. Húzósajtolás	14
3.1. A nanométeres mérettartomány	16
3.2. A makroszkopikus, a mikroszkopikus és a nanoméretű tartomány összehasonlítása	16
3.3. Irányvonalak az egyes tudományágak múlt- és jövőbeli karakterisztikus mérettartományaira vonatkozóan	16
3.4. A NASA nanotechnológiai kutatási tervezete	17
3.5. Egy új termék végső minőségének tervezéséhez a különböző mérettartományok és a köztük lévő kapcsolat alapos megismerése elengedhetetlen előfeltétel.	17
3.6. Valamennyi mérettartományhoz tartozó anyagféleség tulajdonságainak egyidejű ismerete garancia a mérnöki munka sikeréhez (modellezés, szimuláció, tervezés).	17
3.7. Elengedhetetlen a visszacsatolás.	17
3.8. Kulcsfontosságú lépések a kutatás-fejlesztés során.	17
3.9. A nanopöttyök karakterisztikus mérettartománya	19
3.10. Különböző méretű kvantumpöttyekből felépülő kolloidális oldatok szinkibocsátása	20
4.1. A nanokompozit-hibridek tulajdonságai.	23
4.2. A polimermátrixú nanokompozitok fejlesztési útvonalai.	23
4.3. A Young modulus függése a töltőanyag térfogathányadától agyagásvány/nylon-6 nanokompozitban és hagyományos, üvegszál/nylon-6 kompozitban.	23
4.4. A tiszta PMMA mátrix és 5 tömegszázaléknyi nanoméretű alumínium-oxid szemcsét tartalmazó nanokompozit nyúlási diagramja. A beszúrt ábra a törési felületet mutatja.	23
4.5. Szén nanocsővel (a), korom és réz-klorid keverékével (b) és csak korommal (c) töltött epoxigyanta elektromos vezetőképessége a töltőanyag térfogati hányadának függvényében.	24
4.6. A nyúlási szilárdság és a Young-modulus összehasonlítása a nylon-6 mátrix, a legjobb nylon-6 4% tartalmú nanokompozit és egy hagyományos, nylon-6 mátrixban 48 w% üvegszálat tartalmazó kompozit esetén.	24
4.7. A FINEMET® típusú nanokompozit mikroszerkezete bal oldal: a mátrix összetételének változása a Fe-Si kiválások környezetében jobb oldal: a részleges kristályosodás folyamata.	25

4.8. A permeabilitás és a telítési indukció kapcsolata néhány lágymágneses anyagcsaládnál.	25
4.9. Nanokompozit szemcsék kialakulása nagyenergiájú mechanikus ötvözkor.	25
4.10. A kerámiamatrixú nanokompozitok osztályozása: (a) nanoméretű részecskék különböző mátrixban (b) nanorészecskék nanoszemcséjű mátrixban.	26
5.1. A kompozitrészek áttekintése a Boeing 757-200 repülőgépek fő szerkezeti egységeiben. (Forrás: Boeing commercial Airplane company).	27
5.2. A kompozitrészek áttekintése az Airbus A380 repülőgépek fő szerkezeti egységeiben. (Forrás: Boeing commercial Airplane company).	27
5.3. A szén nanocsövek jellemző méretei.	27
5.4. Egydimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok: nanoszálak, nanorudak, nanocsövek – átmérőjük jellemzően 100 nm alatti.	28
5.5. A tömbi és az adszorbeált fázis összehasonlítása szén nanocsöveknél.	28
5.6. Ultrahanghullámok és hatásuk az anyagban.	28
5.7. Kalanderezés.	28
5.8. Keverés.	29
5.9. Az extrúder felépítése.	29
5.10. A kémiai és a fizikai funkcionizálás összehasonlítása.	30
6.1. Oxidkerámia-erősítésű fémmatrixú nanokompozitok.	33
6.2. A ridegség szemléltetése.	33
6.3. Kerámiamatrixú nanokompozitok.	34
6.4. Szén nanocsővel erősített kerámiamatrixú nanokompozitok törési felületei.	34
6.5. Grafénerősítésű szén nanocső.	34
6.6. Bevonatok.	34
6.7. A Langmuir–Blodgett-eljárás elve.	36
6.8. A dekorativitás céljából fémsókkal színezett, egyébként szintelen anódos oxidréteg pórusaiban a színezési időtől függő hosszban, a színező fém minőségétől függő, ~10 nm-es 2D fémkrisztallit nanoszálakat lehet előállítani.	36
6.9. Al/Mn/Al/Mn/Al.... szobahőmérsékleten előállított vékonyréteg-rendszerében hőkezelés (300 °C, 1 óra) hatására végbemenő intermetallikus nanofázis (QC-Al4Mn) képződése.	37
6.10. Ötvözetlen, 1 mm vastagságú acéllemez. a) A felső acéllemez metszeti képe. b) Megolvadt porkeverék.	37
7.1. Teljes térfogatra ható igénybevételek.	38
7.2. Felületre ható igénybevételek.	38
7.3. Az igénybevételek időbeli lefutása.	38
7.4. A nagyszögű röntgenszórás.	39
7.5. Termogravimetria.	39
7.6. Egyszerű fénymikroszkóp.	40
7.7. A transzmissziós elektronmikroszkóp.	40
7.8. Összefüggés a fókuszolt mérete és a felbontóképesség között.	40
7.9. A pásztázó elektronmikroszkóp.	41
7.10. Elektron–anyag kölcsönhatás.	42
8.1. Energiadisziperzív röntgenspektroszkópia.	43
8.2. Atomierő-mikroszkópia.	44
8.3. Kémiaierő-mikroszkópia.	44
8.4. A hagyományos és a nanoméretű töltőanyagok tulajdonságainak és teljesítőképességének összehasonlítása.	45
8.5. Al ₂ O ₃ nanorészecskékkal töltött PP minták Young-modulusa, húzószilárdsága és ütésállósága a töltőanyag-tartalom függvényében.	45
8.6. A Young-modulus függése a töltőanyag térfogat hányadától agyagásvány/nylon-6 nanokompozitban és hagyományos, üvegszállal erősített nylon-8 kompozitban.	45
8.7. Al ₂ O ₃ /SiC nanokompozitok szilárdsága és szívóssága a SiC-tartalom függvényében. · – hárompontos hajlítás és Vickers-keménység; □ – négypontos hajlítás; Δ – négypontos hajlítás és benyomódásos keménységvizsgálat; □ – hárompontos hajlítás és bemetszéses törési szívóssági vizsgálat.	45
8.8. Törések a benyomódási mintázat közelében. A hagyományos bevonatoknál repedések jelentek meg a lamelláris szerkezet közelében, míg ez a nanostrukturális bevonatnál nem jelentkezett. (Hagyományos WC–12%Co és nanoszerkezetű WC–12%Co).	46
8.9. A perkolációs küszöb függése a hossz/átmérő aránytól.	46
8.10. Szén nanocsővel (a), korom és réz-klorid keverékével (b), illetve csak korommal (c) töltött epoxigyanta elektromos vezető-képessége a töltőanyag térfogati hányada függvényében.	46

8.11. Kúpos kaloriméter. A polimerek égési tulajdonságainak univerzális vizsgálatára szolgál a szabványos kúpos kaloriméter.	47
8.12. A tiszta epoxi és a különböző töltőanyagot tartalmazó kompozitok abszorpciaspektruma.	47
9.1. Dr. Sumio Iijima, a szénszálak egyik felfedezője.	49
9.2. A többfalú szénszálak szerkezete.	49
9.3. A szénszálak felhasználása.	49
9.4. A szén nanocsövek elektrotechnikai alkalmazása: téremissziós kijelző.	49
9.5. Nanokompozitok előállítása csökemencében.	50
9.6. A csökemence közelebbről.	50
9.7. A transzmissziós elektronmikroszkóp felépítése.	51
9.8. A transzmissziós elektronmikroszkóp mintamozgatója.	52
9.9. A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése.	52
9.10. A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése.	52
10.1. MWNT/SEBS szenzor.	56
10.2. CNT-PDMS szenzor.	56
10.3. CNT-PDMS szenzor mechanikai ellenállóképessége.	56
10.4. Gázérzékelési érzékenységi görbék (a: metán, b: nitrogén) a koncentráció függvényében.	57
10.5. Perio chip.	58
10.6. A láthatatlan repülőgép.	58
10.7. A Li-ion akkumulátorok kisülési folyamata.	59
10.8. Grafénrétegekből álló energiatároló eszköz.	59
10.9. A papírelem egy cellulózmátrixú anyag, amely irányított szén nanocsöveket tartalmaz. Ezek elektródokként funkcionálnak, így téve lehetővé az energiatárolást.	59
10.10. Szilícium–szén nanokompozit-szemcse (fekete rész a szén, a kék a szilícium).	59
11.1. A tépőzár szerkezete.	60
11.2. A nanotépőzár működése.	60
11.3. A cápabőr szerkezete.	61
11.4. A cápabőr utánzása az úszódresszknél.	61
11.5. A gekkótalp szerkezete.	61
11.6. Rendezett szén nanocsövek mikromintázatos átvitele egy szalagra.	61
11.7. A „gecko tape” szerkezete.	61
11.8. A lótuszhatás.	61
11.9. Napjainkban akár egy átlagos ház szinte minden részében jelen lehetnek nanotermékek.	62
11.10. Az öntisztító utcakő.	63
12.1. Forma-1.	66
12.2. Tenisz.	68
12.3. Horgászat.	68
12.4. Oscar Pistorius	68
12.5. Atlétika.	69
12.6. Golf.	69
12.7. A „Nanosilver” textil.	69
12.8. All Blacks mez.	69
12.9. Súlycsökkentés nanoanyagok használatával.	70
12.10. A téli sporteszközökhöz használt hagyományos és nanoviasz összehasonlítása.	70

Előszó

A jelen digitális tananyag a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0025 számú, "Interdiszciplináris és komplex megközelítésű digitális tananyagfejlesztés a természettudományi képzési terület mesterszakjaihoz" című projekt részeként készült el.

A projekt általános célja a XXI. század igényeinek megfelelő természettudományos felsőoktatás alapjainak a megteremtése. A projekt konkrét célja a természettudományi mesterképzés kompetenciaalapú és módszertani megújítása, mely folyamatosan képes kezelni a társadalmi-gazdasági változásokat, a legújabb tudományos eredményeket, és az info-kommunikációs technológia (IKT) eszköztárát használja.



1. fejezet - A tömbi anyagok rugalmassági tulajdonságai

1. Bevezetés

- A tömbi anyagok rugalmassági tulajdonságai kapcsán áttekintjük a deformálható testek rugalmas változásainak leírására alkalmas mennyiségeket.
- Ismertetjük a szakítóvizsgálat menetét, valamint értelmezzük a vizsgálat során nyerhető szakítódiagramot.
- Bemutatjuk a törés jelenségét és típusait.
- Ismertetjük a viszkoelaszticitás és a gumirugalmasság jellemzőit.
- Összehasonlítjuk a tömbi anyagok, a kompozitok és a nanokompozitok jellemző anyagi tulajdonságait.
- Ismertetjük a kompozitok eredő anyagi tulajdonságait leíró keverési szabályokat.
- Áttekintjük a kompozitokra jellemző felületi tulajdonságokat.

2. Az ideális deformálható testek rugalmassági tulajdonságai

A merev testek alakja külső erők hatására nem változik meg, azaz a test pontjai a kölcsönhatások során állandó távolságban maradnak egymástól. A kiterjedt testek egy másik csoportjának alakja külső erő hatására megváltozik, ezeket a testeket deformálható testeknek nevezzük. A reológia feladata annak meghatározása, milyen választ adnak az anyagok az őket érő erőhatásokra. Az erőhatások és a rugalmas test adott felületi normálisa(i)nak relatív helyzete szerint különböző típusú erőhatásokat különböztetünk meg. A húzó- és nyomóerők párhuzamosak a felület normálisával, a nyíróerők merőlegesek a felületi normálisra, a hidrosztatikai (jellegű) erők pedig minden irányból egyformán hatnak a testre. (1. sz. ábra).

1.1. ábra - A merev testet érő erőhatások csoportosítása

A deformáció leírásához használt fontos idealizált modell a rugalmas (Hooke-féle) alakváltozás. Az ideális rugalmas alakváltozást leíró Hooke-törvény az alakváltozás okaként a testet érő mechanikai feszültséget jelöli meg, és feltételezi, hogy a test nem szenved maradó alakváltozást, azaz a mechanikai feszültség (illetve az erőhatás) megszűntével visszanyeri eredeti alakját. A test relatív alakváltozásán az erőhatás irányába eső hosszirányú méret Δl megváltozásának, valamint az ugyanezen irányú, kiindulási l_0 méretnek a $\Delta l/l_0$ hányadosát értjük; a mechanikai feszültség pedig az erő F nagyságának és a test erőre merőleges A keresztmetszetének F/A hányadosa. Ezekkel a jelölésekkel a Hooke-törvény: $\Delta l/l_0 = (1/E) \cdot (F/A)$. A test relatív alakváltozása egyenesen arányos a testre ható mechanikai feszültséggel. Az arányossági tényező reciprokát az adott anyagra jellemző E rugalmassági modulusnak (vagy Young-modulusnak) nevezzük. A relatív alakváltozásnak nincs mértékegysége, a mechanikai feszültség SI-mértékegysége a $N/m^2 = Pa$. Az anyagok többségének a rugalmassági modulusa a GPa-os tartományba esik. A relatív alakváltozásra gyakran alkalmazzák az ϵ jelölést, míg a mechanikai feszültséget sokszor jelölik a σ betűvel. Ezzel a jelölérendszerrel a Hooke-törvény rövidített írásmódú, ám talán még szemléletesebb alakja: $\sigma = E \cdot \epsilon$. Hasonló összefüggések fogalmazhatók meg a (rugalmas) nyírásra és a kompresszióra is.

1.2. ábra - Nyírás

1.3. ábra - Kompresszió

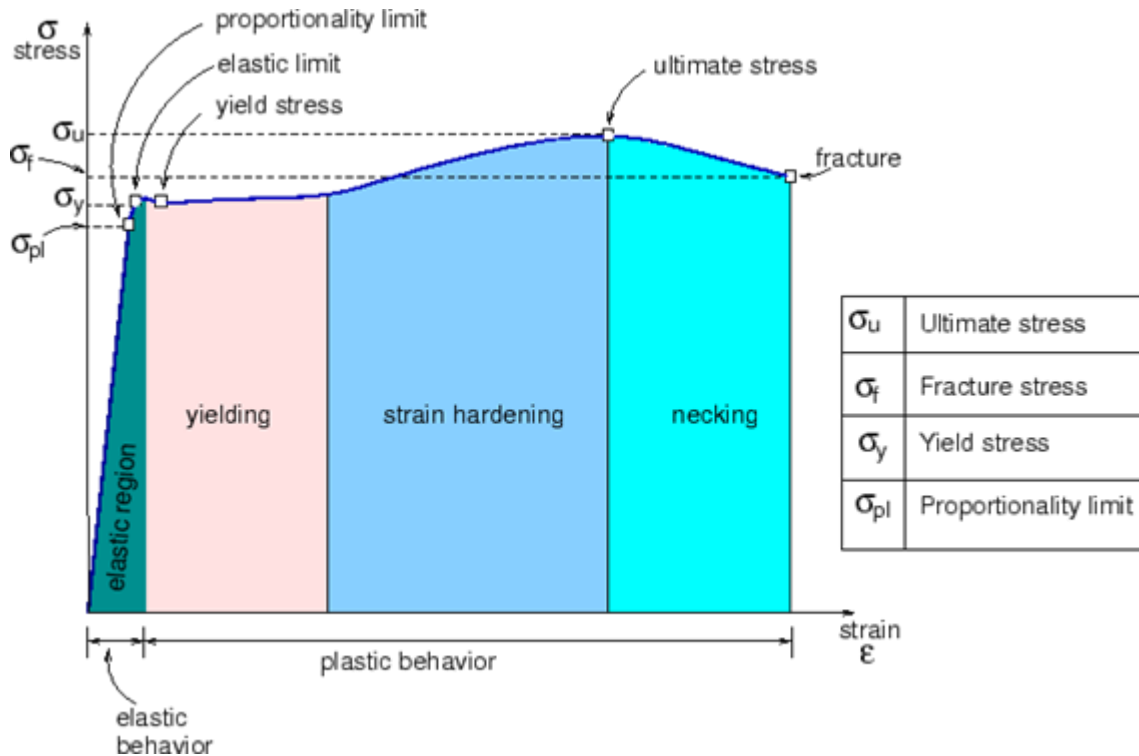
A nyírás során a deformáció oka a $\tau = F/A$ nyírófeszültség, a deformáció pedig a $\gamma = \Delta x/l = \tan \Theta$ szögelfordulással jellemezhető. Ezekkel a jelölésekkel a Hooke-törvény nyírásra vonatkozó alakja $\tau = G \cdot \gamma$, ahol G a test nyírási modulusa. Kompresszió esetén a deformációt a testet körülvevő közeg $p = F/A$ nyomása idézi elő, a deformációt pedig a $\kappa = \Delta V/V$ relatív térfogatváltozás jellemzi. A Hooke-törvény kompresszió esetén a következő alakot ölti: $p = -K \cdot \kappa$, ahol K a test kompressziómodulusa (a negatív előjel a nyomás hatására bekövetkező térfogatsökkenést tükrözi).

3. A szakítóvizsgálat és a szakítódiagram

A deformálható anyagok egyik alapvető anyagvizsgálati módszere a szakítóvizsgálat, mely során a mintát egyirányú mechanikai feszültségnek teszik ki, egészen a szakadásig vagy törésig. A szakítóvizsgálat során a következő mennyiségek határozhatók meg közvetlenül: a szakítószilárdság, a maximális megnyúlás és a keresztmetszet-csökkenés. Ezekből a mennyiségekből a következő mennyiségek származtathatók: a Young-modulus, a Poisson-tényező, a folyáshatár és a felkeményedési tulajdonságok. A szakítóvizsgálat mintadarabjának keresztmetszete szabványosított, piskóta alakú. A minta két végén kiszélesedő befogási rész található, ezek között helyezkedik el a mérési tartomány. A két befogási rész kellően nagy ahhoz, hogy a mintadarab szilárdan befogható legyen, a középső mérési tartomány pedig kisebb keresztmetszetű, így a deformáció, valamint a szakadás ezen a részen következik be. A mechanikai feszültség és a relatív megnyúlás közötti, adott anyagra jellemző kapcsolatot az anyag szakítódiagramja szemlélteti. Ez a függvénykapcsolat az adott anyagra jellemző, és a különböző mértékű húzófeszültségek (vagy nyomófeszültségek) esetén mért deformáció (relatív megnyúlás) mérésével nyerhető. Az így kapott görbe számos anyagi tulajdonságról ad tájékoztatást, köztük az E rugalmassági vagy Young-modulusról. A különböző anyagok szakítódiagramja igencsak eltérő lehet, emellett ugyanazon anyagnál is különböző eredmények adódhatnak a minta hőmérsékletétől vagy a terhelés változtatásának sebességétől függően. Ennek ellenére a különböző anyagcsoportok szakítódiagramjain megfigyelhetők azonos jellegzetességek, ezek alapján az anyagok két széles kategóriába sorolhatók: a képlékeny és a rideg anyagok közé. A szakítóvizsgálat fő kimenete a megnyúlást a terhelés függvényében szemléltető függvény, mely a mechanikai feszültséget a relatív megnyúlás függvényében ábrázoló szakítódiagrammá számolható át. Mivel a mérnöki gyakorlat ez utóbbi két mennyiséget a húzóerő, illetve a megnyúlás konstans értékekkel történő elosztásával nyeri (mely konstansok a mintadarab eredeti geometriai méretei), a húzóerő–megnyúlás függvény alakja meg fog egyezni a szakítódiagram menetével. A szakítódiagram a kifejtett mechanikai feszültség és az ebből fakadó relatív megnyúlás között teremt kapcsolatot, így minden anyag egyedi szakítódiagrammal rendelkezik. Egy jellemző szakítódiagram az alábbi ábrán látható. Ha a mechanikai feszültség tényleges keresztmetszet alapján számolt valódi értékeivel dolgozunk, az tapasztalható, hogy a szakítódiagram a szakadási pontig monoton növekszik.



1.4. ábra - A szakítódiagram nevezetes tartományai és pontjai



A lineáris (rugalmas) tartományban a mechanikai feszültség és a relatív megnyúlás az ábrán látható módon egyenesen arányosak egymással, ami azt mutatja, hogy itt nem következik be képlékeny alakváltozás. Ennek megfelelően a terhelés megszüntetésével az anyag visszanyeri eredeti alakját. A lineáris tartományban a görbe a Hooke-törvény alapján definiált összefüggést követi, mely szerint a mechanikai feszültség és a relatív alakváltozás hányadosa konstans. Ebben az arányossági tartományban a görbe meredeksége az ún. rugalmassági vagy Young-modulust adja. A rugalmassági modulus (E) jellemzi az anyag válaszát, miközben mechanikai feszültség hatására deformálódik, majd a terhelés megszűnésével visszanyeri eredeti alakját. Ezáltal a rugalmassági modulus az anyag merevségének mértéke.

1.5. ábra - A különböző anyagcsoportok jellemző Young-modulusa

A rugalmassági modulus kiszámításához egyszerűen a mechanikai feszültség és a relatív megnyúlás hányadosát kell képezni. Mivel a relatív alakváltozás dimenzió nélküli mennyiség, a rugalmassági modulus mértékegysége megegyezik a mechanikai feszültség mértékegységével (a gyakorlatban általában MPa). A rugalmassági modulus különösen abban az esetben használják, ha egy elemet húzóerő hatásának tesznek ki, és a megnyúlás mértékét kell meghatározni. A tengelyirányú feszültség mindig ellentétes előjelű laterális feszültségekkel párosul a tengelyre merőleges két másik irányban. A hossz növelését jelentő relatív megnyúlást pozitív értelműnek tekintjük, így a hosszcsökkenést eredményező pedig negatívnak. Egytengelyű erő kifejtésnél a Poisson-tényező a laterális és axiális relatív megnyúlások hányadosának abszolút értékeként definiálható: $\mu = |\epsilon(\text{laterális})/\epsilon(\text{axiális})|$. Ez a hányados a relatív megnyúlásokhoz hasonlóan dimenzió nélküli mennyiség, mely a rugalmassági tartományon belül jó közelítéssel állandó. Tökéletesen izotrop rugalmas anyagoknál a Poisson-szám értéke 0,25, azonban a legtöbb valódi anyagnál ez az érték a 0,28–0,33 tartományban van. Acélokra a Poisson-tényező értéke kb. 0,3. Ez azt jelenti, hogy az anyagra kifejtett mechanikai feszültség irányában mérhető egységnyi relatív hosszváltozás a rá merőleges irányokban 0,3 egységnyi relatív alakváltozást von maga után.

A rugalmassági állandók közül csak kettő független, így a harmadik kifejezhető a másik kettőből a következő képlet alapján: $E = 2(1 + \mu)G$, ahol E a rugalmassági modulus (Young-modulus), μ a Poisson-tényező és G a csúsztató rugalmassági modulus (nyírási rugalmassági modulus).

4. Képlékeny anyagok

1.6. ábra - A szerkezeti acél szakítódigramja

1. Szakítószilárdság
2. Folyáshatár
3. Szakadás
4. Felkeményedési tartomány
5. Nyakképződési tartomány

A Látszólagos feszültség

B Tényleges feszültség

A képlékeny anyagok (pl. a szerkezeti acél és számos más fémötvözet) az adott hőmérsékleten bekövetkező folyás mértékével jellemezhetők. Az alacsony széntartalmú acél általában lineáris kezdetű szakítódigrammal és jól definiálható folyáshatárral rendelkezik. A görbe lineáris része az úgynevezett rugalmassági vagy elasztikus tartomány, melynek mereedsége adja az anyag Young-modulusát vagy rugalmassági modulusát. A folyáshatárt követően a görbe jellemzően csökkenő tendenciát mutat, mely mögött a diszlokációk elmozdulása áll. A további deformáció hatására a mechanikai feszültség növekszik a felkeményedés miatt, egészen a szakítószilárdság értékének eléréséig. A szakítószilárdság elérését megelőzően a keresztmetszet a Poisson-kontrakció hatására egyenletesen csökken. Ezen a ponton túl azonban különbözni fog az anyag viselkedése: ún. nyakképződés figyelhető meg. Ennek során a helyi keresztmetszet-csökkenés jelentősebb mértékű, mint a mintadarab többi részén, így a (tényleges) mechanikai feszültség növekedni fog. Ezzel szemben a mérnöki feszültség görbéjén csökkenés tapasztalható. Ha azonban a fizikai mechanikai feszültség és relatív megnyúlás közötti összefüggést ábrázoljuk, a feszültség tovább növekszik egészen a szakadásig. A nyak instabil képződmény, és a mintadarab ezen a részen fog elszakadni. A tényleges szakadási pont és a görbén megfigyelhető szakadási pont egymás alatt találhatók.

A kevésbé képlékeny anyagok, így az alumínium, illetve a közepes vagy nagy széntartalmú acélok nem rendelkeznek egyértelmű folyáshatárral, ehelyett két jellemző érték, a felső és az alsó folyáshatár különböztethető meg. Ezeknél az anyagoknál a folyási határt jellemzően az eltolási módszerrel határozzák meg. A görbe lineáris részével párhuzamos egyenest húznak, mely a függőleges tengelyt egy adott értéknél (általában 0,1 - 0,2%-os relatív megnyúlási értéknél) metszi. Ennek az egyenesnek, valamint a szakítódigram görbéjének a metszéspontját tekintik folyáshatárnak.

1.7. ábra - A folyáshatár grafikus definíciója

A görbe elasztikus tartománya megfelel annak a feszültségtartománynak, amelyen belül a terhelés megszüntével az anyag visszanyeri az eredeti alakját. Az ezen kívüli, plasztikus tartományban ezzel szemben bizonyos mértékű maradó alakváltozás tapasztalható a terhelés megszüntetését követően. A szakadási pont a mintadarab töréséhez tartozik.

5. Rideg anyagok

1.8. ábra - Rideg anyagok szakítódigramja

A rideg anyagokra az jellemző, hogy a törés előtt nem látható jelentős változás a relatív megnyúlás változási ütemében. A rideg anyagoknak, így például az üvegnek vagy a kőnek nincs folyáshatára, és nem mutatnak felkeményedést sem. Ennek megfelelően a szakítószilárdság és a törőszilárdság értéke megegyezik. A jellemző szakítási diagramja az ábrán látható módon jellemzően lineáris, hiszen a rideg anyagok alig mutatnak képlékeny alakváltozást, hanem rugalmas igénybevétel esetén eltörnek. A rideg törés során létrejövő darabok összeilleszthetők, ugyanis a képlékeny anyagokkal ellentétben itt nem történik nyakképződés. Érdemes megjegyezni, hogy az üvegszál szakítószilárdsága nagyobb, mint az acélé, ezzel szemben a tömör üveg szakítószilárdsága kisebb annál. Ennek az az oka, hogy az ún. feszültségintenzitási tényező (egy specifikusabb rugalmassági paraméter) függ az anyagban lévő szerkezeti hibáktól, és a minta méretének növelésével a hibahelyek száma is nő. Általánosságban elmondható, hogy például egy kötél szakítószilárdság mindig kisebb, mint a kötelet alkotó elemi szálak szakítószilárdságainak összege.

6. A törés jelensége

1.9. ábra - Rideg törés üvegben

1.10. ábra - Alumínium forgattyúskar fáradásos törése

A rideg törés általában elhanyagolható mértékű képlékeny alakváltozás előzi meg. Ha húzófeszültség hat a kristályos anyagokra, a kis kötöttségű kristálytani síkok felbomlása hasadással történik. Az amorf szilárd testek ezzel szemben nem rendelkeznek kristályos szerkezettel. Mivel ilyenkor az előbb említett síkok menti hasadás nem következhet be, a húzófeszültség ún. kagylós törést eredményez. A kagylós törésnél a repedések a kifejtett húzóerőre merőleges irányban terjednek.

1.11. ábra - Tengelyirányú feszültségnek kitett mintadarab képlékeny szakadása.

A képlékeny törés esetén a törést igen jelentős képlékeny alakváltozás (nyakképződés) előzi meg. Ilyenkor nem is beszélhetünk igazi törésről, hanem a két darab durva felülettel elválik egymástól. A törés előtt a repedés lassan terjed, és ezt a folyamatot számottevő energiaelnyelés kíséri. A töréshez tartozó relatív alakváltozást az anyag tisztasága határozza meg. Számos képlékeny anyag, igen nagy deformációt képes elviselni törés előtt. A tiszta vas például akár 100%-os relatív megnyúlást is mutathat törés előtt. Ezzel szemben az öntött vas vagy a nagy széntartalmú acélok törés előtti maximális relatív megnyúlása alig 3%.

1.12. ábra - A képlékeny törés lépéseinek sematikus ábrázolása (csak tengelyirányú feszültség esetén.)

7. Viszkoelaszticitás

Viszkoelaszticitásról akkor beszélünk, ha deformáció során az anyag egyszerre mutat viszkózus és elasztikus tulajdonságokat. Amikor mechanikai (nyíró-)feszültség hat a viszkózus anyagokra, a nyírási áramlás és a nyírási feszültség időben lineáris módon épül fel. Az elasztikus anyagok ezzel szemben azonnali megnyúlással reagálnak a feszültségre, és a feszültség megszűnésekor ugyanilyen pillanatszerűen nyerik vissza eredeti alakjukat. A viszkoelasztikus anyagok ezt a két tulajdonságot ötvözik, és ennek megfelelően időfüggő

alakváltozást mutatnak. A korábbiakban tárgyalt rugalmas jelenségek a rendezett szilárdtestek kristálytani síkjai között ható kötések megnyúlásával magyarázhatók. A viszkozitás ezzel szemben az amorf anyagokon belül lejátszódó atomi vagy molekuláris diffúzió eredménye. A viszkoelasztikus anyagok néhány tulajdonsága:

A) Állandó feszültség hatására a relatív alakváltozás időben növekszik (kúszás).

1.13. ábra - A relatív megnyúlás (a) időfüggése viszkoelasztikus anyagban állandó mechanikai feszültség mellett (kúszás).

A kúszás matematikai modellje az ún. Kelvin–Voigt-elem, mely egy rugó (mint rugalmas elem) és egy csillapító (mint viszkózus elem) párhuzamos kapcsolásával keletkezik. A relatív megnyúlás időfüggését az $\varepsilon(t) = (\sigma_0/E)(1 - \exp(-t/\tau))$ függvény adja, ahol σ_0 a testre ható állandó feszültség, E a Young-modulus és τ pedig a retardációs idő. A folyamat ez utóbbi időállandója a viszkozitás és a Young-modulus hányadosa.

1.14. ábra - A Kelvin–Voigt-modell

B) Állandó relatív alakváltozás mellett a feszültség időben csökken (feszültségre relaxáció).

1.15. ábra - A relatív megnyúlás (a) és a keletkező mechanikai feszültség (b) időfüggése viszkoelasztikus anyagban (feszültségre relaxáció).

A feszültségre relaxáció az ún. Maxwell-elemmel modellezhető, mely egy rugó és egy csillapító soros kapcsolásával keletkezik. A mechanikai feszültség időfüggését a $\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \exp(-t/\tau)$ függvény adja, ahol σ_0 a kezdeti feszültség, τ pedig a relaxációs idő. A folyamat időállandója itt is a viszkozitás és a Young-modulus hányadosa.

1.16. ábra - A Maxwell-modell.

C) Ciklikus feszültségváltozás hatására hiszterézis jelentkezik, amely mechanikai energia disszipációjával jár – a veszteség munkát a hurok területéből számolható.

1.17. ábra - Hiszterézis ciklikus alakváltozásnál.

8. Gumirugalmasság

A gumirugalmasság az ún. hiperelaszticitás egyik jellemző példája, mely számos polimer, különösen a keresztkötéseket tartalmazó, nagyrugalmas fizikai állapotú polimerek mechanikai viselkedését jellemzi. A gumirugalmasság elméleti leírásánál keresztkötéseket tartalmazó polimerlánc-hálózatot vesznek alapul, melyet ún. „entropikus rugónak” tekintenek. A lánc megnyújtásakor a rendszer entrópiája nagymértékben csökken, mert kevesebb konformációs lehetőség áll ilyenkor rendelkezésre. Ennek megfelelően visszatérítő erő lép fel, mely egy rugóhoz hasonlóan az egyensúlyi (vagy nyújtatlan) állapotba téríti vissza a polimert. Ez magyarázza, miért tér vissza például a gumiszalag a megnyújtást követően az eredeti állapotába.

A gumira jellemző σ mechanikai feszültség a $\sigma = kTv \cdot (\lambda - 1/\lambda^2)$ képlettel adható meg, ahol k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet, v és λ pedig a láncvégek koncentrációja (térhálósűrűség), illetve relatív hossza. Ebből az összefüggésből látható, hogy a gumirugalmasság (az előző statisztikai megközelítésnek megfelelően) termodinamikai eredetű. Kis megnyúlásoknál az előző képlet a $\sigma = kTv(\lambda - 1)$ alakra egyszerűsödik, mely a Hooke-törvény értelmében az $E = kTv$ hőmérséklettől és térhálósűrűségtől függő Young-modulust eredményezi.

9. A kompozitok mechanikai tulajdonságai

A kompozit anyagok (vagy kompozitok) olyan természetes vagy mesterséges anyagok, amelyek két vagy több, különböző fizikai vagy kémiai tulajdonságokkal bíró anyagból keletkeznek, melyek megőrzik önállóságukat a kompoziton belül.

A kompozitok fizikai tulajdonságai általában nem irányfüggetlenek (izotropok), hanem anizotropok, azaz például a külső erőkre adott válasz függ az erőhatás irányától. Izotrop anyagok esetén az erők okozta relatív alakváltozás a korábbiakban tárgyalt matematikai összefüggéseken keresztül tárgyalható a Young-modulus, a nyírási rugalmassági modulus és a Poisson-tényező segítségével. Anizotrop anyagoknál az irányfüggés miatt ezek a kapcsolatok egy másodrendű tenzoron keresztül, 21 anyagi állandóval írhatók le. Például háromtengelyű szimmetria esetén a Young-modulus, a nyírási rugalmassági modulus és a Poisson-tényező egyenként három konstanssal adható meg. Ennek megfelelően 9 állandó írja le az erők (illetve momentumok) valamint a relatív alakváltozások közötti kapcsolatot.

A kompozit anyagok eredő mechanikai tulajdonságait meghatározzák az összetevők egyedi mechanikai tulajdonságai (P) valamint az összetevők részaránya (x), azonban a köztük lévő összefüggések, az ún. keverési szabályok függenek az adott mennyiségtől is:

- kombináció: $P = x(a)P(a) + x(b)P(b)$ (pl. sűrűség),
- harmonikus átlagolódás: $1/P = x(a)/P(a) + x(b)/P(b)$ (pl. nyírási modulus),
- mértani átlagolódás: $P = (P(a)^{x(a)} + P(b)^{x(b)})^{1/2}$ (pl. a viszkozitás egyes esetekben).

A gyakorlati életben a kompozitképzésnek két fő célja van, az erősítés és a töltés. Az erősítés során erős kölcsönhatást alakítanak ki a töltőanyag és a mátrix között, mely alkalmas az erőhatások közvetítésére. Ennek hatására a szerkezeti anyag számos mechanikai tulajdonsága javul. A töltés során csak gyenge kölcsönhatás lép fel a töltőanyag és a mátrix között, emiatt az erőhatások nem adódnak át. Bár látszólag ennek semmi gyakorlati haszna nincs, gazdasági jelentősége számottevő, hiszen ez az ún. térfogatnövelő kompozitképzés (olcsó töltőanyag használatával) csökkenti a kompozit fajlagos előállítási költségét, miközben (előrelátó anyagtervezést feltételezve!) a mechanikai tulajdonságok nem romlanak számottevően.

1.18. ábra - A kompozitok eredő mechanikai tulajdonságai.

A fenti táblázat a polimermátrixba ágyazott kerámia töltőanyagból létrejövő kompozit mechanikai tulajdonságainak megváltozását szemlélteti. A kerámia jó kompressziómodulussal rendelkezik, míg a polimerek törésállósága kiváló. Látható, hogy a kapott kompozitanyag ötvözi ezt a két tulajdonságot. Ezzel szemben hiába rendelkezik a kerámia szerkezeti szempontból kiváló Young-modulussal és nyírási modulussal, a kompozit nem örökli ezt a tulajdonságot. Ha azonban a kerámia töltőanyag jellemző méretei a nanotartományba esnek, a megnövekedett felületi kölcsönhatások képesek gondoskodni a kiváló nyújtási és nyírási rugalmassági tulajdonságokról is. Ez tehát kiváló példát mutat arra, hogy a nanokompozitok esetenként a hagyományos kompozitoknál is kedvezőbb tulajdonságokat képesek kínálni.

A molekuláris mobilitás csökkentése ugyancsak erősítéssel valósítható meg. Ilyenkor a töltőanyag szemcseméretének csökkentésével a fajlagos felület nő, így az erősítő hatás növekszik (pl. polimerláncok elmozdulásának megakadályozása).

A felületi súrlódást sok tényező befolyásolja, elsősorban a komponensek szegregációja és a kevésbé tapadó szemcsék leválása. Ez kihatással van a keménységre is. Ez utóbbi mérésénél fontos szerepe van a mérőeszköz méretének, ugyanis nem mindegy, hogy a beágyazott szemcsék egyedi keménységét, vagy a kompozit átlagos keménységét mérjük. A kopást ugyancsak jórészt a szemcsék kötöttsége határozza meg, míg a permeabilitásnál

a szemcsék alakjának, méretének és koncentrációjának van szerepe, hiszen ezek döntenek el, mennyire „egyenes út” áll a diffundáló részek előtt.

10. Ellenőrző kérdések

Csoportosítsa a merev testet érő erőhatásokat, jellemezze az egyes típusokat!

Röviden ismertesse a szakítóvizsgálat menetét, milyen információkat szolgáltat az eljárás?

Rajzolja fel a fémekre jellemző szakítódiagramot, jelölje be a diagram nevezetes pontjait, tartományait!

Definiálja a következő fogalmakat: szakítószilárdság, folyáshatár, szakadás.

Definiálja a következő fogalmakat: látszólagos feszültség, tényleges feszültség, relatív megnyúlás.

Mondja ki Hooke törvényét, definiálja a Young-modulust!

Ismertesse a rugalmassági állandókat és a köztük lévő összefüggéseket!

Jellemezze a rideg anyagokat, mi a különbség a rideg és a fáradásos törés között?

Röviden ismertesse a viszkoelaszticitást és a hozzá kapcsolódó jelenségeket!

Milyen szabályszerűségek szerint alakulhatnak ki a kompozitok eredő mechanikai tulajdonságai?

2. fejezet - A kompozitok általános jellemzése

1. Bevezetés

A kompozitanyagok olyan heterogén rendszerek, melyeket két vagy több anyag összekapcsolásával (társításával) alakítanak ki. Ezekben a rendszerekben az alkotók kémiai összetétele és legtöbbször alakja is különbözik: az egyik alkotó folytonos (ezt nevezzük mátrixnak) és körülveszi a diszpergált fázist. A mátrix és a beágyazott rendszer közötti határfelületnek döntő szerepe van a tulajdonságok kialakításában. A kompozitképzéssel olyan tulajdonságok vagy tulajdonságkombinációk érhetők el, amelyek az alkotókkal külön-külön nem hozhatók létre. A kompozitokkal legtöbbször – de nem mindig – a mechanikai tulajdonságok javítása a cél.

A kompozitok előállítása alapvetően kétféle úton történhet.

a) Külön állítják elő a mátrixot és a diszperz fázist, majd utólag keverik őket össze. A diszperz fázist alkotó részecskék méretének csökkenésével ez az út egyre nehezebben járható.

b) A kompozit in-situ előállítása (pl. eutektikum létrehozása). Ilyenkor a kompozitokat legtöbbször végső alakjukban készítik el (near-net-shape), és utólagos alakítást csak ritkán alkalmaznak.

2. A kompozitok csoportosítási lehetőségei

a) Csoportosítás anyagpárok szerint

- fém–fém kompozitok
- fém–kerámia kompozitok
- kerámia–kerámia kompozitok
- polimer–üveg kompozitok
- polimer–polimer kompozitok

2.1. ábra - A kompozitok csoportosítása

<http://www.szfki.hu/~konczos/tanfolyam/9.pdf>

b) Csoportosítás a komponensek morfológiája szerint

- szemcsés kompozitok (particulate composite)
- szálás kompozitok (fiber reinforced composite)
- lemezes vagy réteges kompozitok (laminated composite)

2.2. ábra - A kompozitok fajtái

<http://www.szfki.hu/~konczos/tanfolyam/9.pdf>

c) Csoportosítás a mátrix anyaga szerint

- polimermátrixú kompozitok
- fémmátrixú kompozitok

- kerámiamátrixú kompozitok

3. Szemcsés kompozitok

A szemcsés kompozitokban a diszperz fázist ekvixiális szemcsék alkotják, melyek mérete széles tartományban változhat (a több milliméteres átmértől egészen a nanométeres átmérőig). A szemcsés kompozitoknál a kialakítás célja a mechanikai tulajdonságok módosítása, így a keménység növelése és a kúszás csökkentése, azonban általában nem törekednek a szilárdság növelésére. Másik fontos cél lehet az ár csökkentése (pl. ásványi őrlemények polimerekbe történő adagolásakor). A szemcsés kompozitok előállítása történhet kohászati módszerekkel (pl. kiválások létrehozása megszilárduláskor vagy hőkezeléssel), porkohászati eljárásokkal vagy egyéb módon.

A szemcsés kompozitok felhasználási területei:

- csiszolóanyagok (korund-, szilícium-karbid vagy gyémántszemcsék fémes vagy polimermátrixba ágyazva),
- keményfém (WC-Co) megmunkáló szerszámok,
- hagyományos keménymágneses anyagok, melyeknél a domének mozgását kiválások létrehozásával gátolják (bár az újfajta mágneses nanokompozitokban pont a nanoméretű kiválások javítják a lágymágneses tulajdonságokat),
- elektromos kontaktus anyagokként pl. erősáramú kapcsolókban.

A szilárd fémhabok olyan szemcsés kompozitok, amelyekben a diszperz fázis gázbuborék, nem pedig valamilyen kemény szemcse. Előállítás történhet olvadék „habosításával” (ilyenkor gázt fúvatnak be a megfelelő viszkozitású fémolvadékba), vagy olyan anyag (például titán-hidrid) olvadékba történő adalékolásával, amelyből az olvasztás hőmérsékletén gáz szabadul fel. Az előállítási paraméterek megfelelő megválasztásával a buborékok mérete és zártága jól szabályozható. A szilárd fémhabok jó hő- és hangszigetelő képességgel rendelkeznek, valamint alkalmasak az ütközési energia elnyelésére, ugyanis összenyomásukhoz jelentős energiát kell befektetni. Ennek megfelelően előnyösen használhatók gépkocsikban. Emellett folyadékok szűrésére, áramlásuk ellenőrzésére is használhatók. Napjainkban az alumíniumalapú fémhabok iránt mutatkozik a legnagyobb az érdeklődés, melyeket alumíniumolvadék gázinjektálással történő közvetlen habosításával állítanak elő.

2.3. ábra - Alumínium fémhab előállítása

4. Szálas (szálerősítésű) kompozitok

A szálas kompozitok jelentősen javítják a mátrix mechanikai tulajdonságait (pl. szilárdságot, a szilárdság/tömeg arányt, a tribológiai jellemzőket, a szívósságot) a mátrixba épített nagy szilárdságú, merev szálak segítségével. A szálerősítés mechanizmusa bonyolult, emiatt a kompozit tulajdonságai általában nem vezethetők le egyszerű „keverési szabállyal” a mátrix, illetve a szál tulajdonságaiból.

a) Erős kötés a szálak és a mátrix között

A szakítószilárdság (az elszakításhoz szükséges húzóerő) ilyenkor jelentősen növekszik, ugyanis a terhelés nagy részét átveszik a szálak. Fontos szerepet játszanak ebben az esetben a nedvesítési viszonyok, emiatt szükség esetén megfelelő bevonatot alakítanak ki a szálak felületén a nedvesítés elősegítésére. (Az alumíniumolvadék például nem nedvesíti a szénszálat, ezért annak felületét nikkellel vagy tantállal vonják be.) A mátrix és a szál határfelületén esetlegesen lejátszódó kémiai reakció viszont a szál részleges oldódásához vezethet, különösen magas hőmérsékleteken.

b) Közepes erősségű kötés a szálak és a mátrix között

Például kerámiák szívóssága szálak beépítésével növelhető. A kerámiamátrixok ugyanis elegendően nagy szilárdságúak, viszont képlékenyen nem alakíthatók, hanem rideg törést szenvednek. Szálerősítésnél terhelés

hatására a mikrorepedés terjedés közben eléri a szálát (debonding), emiatt az egyébként rideg mátrix „szívóssá” válik.

2.4. ábra - Szálerősítésű kompozit szakítódiagramja

2.5. ábra - Mikrorepedés szálerősítésű kompozitban

A mátrix és a szál közötti határfelület kialakítása fontos szerepet játszik a kompozit számos tulajdonságának kialakításában, emiatt fontos a szálak architektúrája, azaz a szálak elrendezése, geometriája és mennyisége. A szálak elrendeződésének megváltoztatása lehetőséget ad a szilárdság adott irányokban történő növelésére. Ennek megfelelően alkalmazhatnak folytonos, egyirányú szálakat, véletlen orientációjú rövid szálakat vagy egymásra merőleges szálakat. A szilárdság növelése szempontjából kedvező, ha a szál hosszúságának és átmérőjének hányadosa (a szál „karcsúsága”, aspect ratio) minél nagyobb, értéke jellegzetesen 30 és 1000 között van. A szálak térfogatarányának növelése ugyancsak kedvező a szálerősítés szempontjából.

Az erősítőszálaknak különféle elvárásoknak kell megfelelniük: jó mechanikai tulajdonságokkal (szilárdság, modulus) kell rendelkezniük (kis sűrűség mellett), megfelelő kötést kell kialakítaniuk a mátrixszal (ez a hőtágulás hasonlóságának szükségességét is maga után vonja) és kis átmérővel kell rendelkezniük (ez kevesebb hibahelyet és nagy fajlagos felületet eredményez). A szálak anyaga lehet fém, üveg, kerámia, polimer, szénalapú erősítőszál, továbbá tűkristályok. A szálak átmérője általában 1–10 μm körüli, de vannak ennél vékonyabbak szálak (pl. a tűkristályok) és jóval vastagabbak is (pl. 100 μm átmérőjű monofilamentek). A hibrid kompozitban különféle anyagú szálak vannak ugyanazon mátrixban. A szálakat kötegekben, esetenként szövet vagy háló formájában forgalmazzák.

2.6. ábra - A kompozitok csoportosítása

A fémszálak közül elsősorban acél- és volfrámszálakat használnak, melyeket dróthúzással állítanak elő, és elsősorban fémmátrixú kompozitokba építenek. Újabban a volfrámszálak kerámiaszálak magjaként is funkcionálnak.

A legelterjedtebbek az üvegszálak, melyeket olvadékból állítanak elő. Az üvegszálak nagy szilárdságúak és nagy modulusúak, emellett olcsók.

A polimerszálak előállításakor a viszkózus olvadékot extrúder segítségével kényszerítik át a szálképző fejen, és a feszítés hatására a polimert alkotó szénláncok beállnak a szál tengelyének irányába. Gyakran alkalmazott polimerszál az aramid (ARomatic polyAMIDe), mely nagy modulusú erősítőszál. Az aramidszálban a szénlánc aromás, és nitrogéntartalmú csoportokból épül fel. A szénláncban kovalens, a szénláncok között pedig hidrogénhid-kötések találhatók. A legismertebb aramidszál a KEVLAR®.

2.7. ábra - Kompozitgyártás olvasztásos módszerrel

A szénszálakat tengelyirányban grafitrácsból felépülő alapsík alkotja. A szénszálakban erős kovalens kötések hatnak, a C–C távolság 0,142 nm, a szénszálak Young-modulusa $E = 1060 \text{ GPa}$. A szénszálak előállítása polimerek termikus bontásával (pirolízissel) történik, a kiinduló anyag (prekurzor) gyakran poli(akril-nitril) (PAN). Egy-egy elemi szál átmérője kb. 8 μm , Young-modulusa az előállítás körülményeitől függően 230–500 GPa.

A szén nanocsövek felfedezéséért 1996-ban adományoztak Nobel-díjat. A felfedezés előzménye a fullerének felfedezése volt (Smalley, Kroto és Curl, 1985), melyet először a többfalú szén nanocsövek (MultiWall Carbon NanoTube, MWNT) felfedezése (Iijima, 1991), majd az egyfalú szén nanocsövek (Single Wall Carbon NanoTube, SWNT) felfedezése (1993) követte. A szén nanocsövek gyakorlatilag „egydimenziós struktúrák”, kémiaiilag ellenállóak, termikusan stabilak. A C–C kötéstávuk 0,142 nm, kötései erősek (a C–C kötés kötés energiája 356 kJ/mol). Az egyfalú szén nanocsövek egy feltekert grafénlapból állnak, míg a többfalú szén nanocsövek koncentrikusan egymásba épülő egyfalú szén nanocsöveknek tekinthetők. A többfalú szén nanocsövekben a hengerpalástok közötti távolság 0,34 nm, ehhez képest az egykristályos grafit rétegtávolsága 0,335 nm, míg a turbosztraktikus grafit rétegtávolsága <0,344 nm. (A turbosztraktikus grafit az egykristályos grafithez képest rendezetlen struktúrák jellemzésére használt kifejezés: az egymás felett elhelyezkedő rétegekben – az ABAB szekvencia helyett – a hatszögek állása véletlenszerű). A többfalú szén nanocsövek külső átmérője néhány 10 nm, belső átmérője pedig néhány nm. Ebből a két dimenzióból a rétegek száma megadható.

A kerámiaszálakat kedvező szilárdságuknak és kis sűrűségüknek köszönhetően több kompozitban hasznosítják. Ridegségük miatt magként vékony (kb. 12 μm átmérőjű) volfrám- vagy szénszálakat használnak, amelyre leválasztják a kerámiát (pl. bórt vagy szilícium-karbidot) CVD módszerrel (Chemical Vapor Deposition, kémiai gőzfázisú leválasztás). A bórszál felületén esetenként szilícium-karbid vagy bór-nitrid bevonatot alakítanak ki az oxidációval szembeni ellenállás javítására, ezeket nevezik BORSIC szálaknak. A szál végső átmérője kb. 100–200 μm . Az alumínium-oxid szálakat (SaffilR) ipari jelentőséggel bírnak.

A tűkristályok (whiskerek) általában 50 μm -nél kisebb átmérőjű, nagyon kevés kristályhibát tartalmazó egykristályok. Szakítószilárdságuk rohamosan nő az átmérő csökkenésével, és közelít az elméletileg várható szilárdsághoz. Anyaguk sokféle lehet (pl. fémek, ionkristályok), előállításuk bonyolult kémiai módszerekkel történik. Főleg szilícium-karbid és alumínium-oxid tűkristályokat alkalmaznak elsősorban különleges fém-, illetve kerámiamátrixú kompozitokban. Alkalmazásukat hátráltatja, hogy drágák.

5. Lemezes kompozitok

A lemezes kompozitok jellegzetes rétegszerkezetek, ilyenek például a bimetálok, a szendvicsszerkezetek és felületi rétegek. Kialakításuk célja például a szilárdság növelése, a súly csökkentése (szendvicsszerkezetek), különleges hőátadási tulajdonságok kialakítása (bimetálok, üvegebe forrasztható ötvözetek). A kívánt anizotrop vagy izotrop mechanikai tulajdonságok kialakítása érdekében irányítottan elrendezett hosszú szálakat alkalmaznak. A gyakorlati felhasználások között szerepel a furnérlemez, az autók biztonsági üvege, a bimetál, az USA pénzerméinek egy része (ezeknél az érmék magja aránylag olcsó Cu–Ni (20%) ötvözet, mely két oldalán kopásálló és kevésbé oxidálódó Cu–Ni (80%) réteggel bevonva). A méhsejtszerkezetek nagyszilárdságú, könnyű szerkezetek, melyeknél egy középső, cellás elrendezést tart össze a két határoló lap. A rögzítés történhet ragasztással, forrasztással, hegesztéssel.

2.8. ábra - Lemezes kompozitok

6. A mátrix anyaga

A kompozitok mátrixa különféle anyag lehet, például polimer, fém, kerámia. A mátrix anyaga befolyásol(hat)ja a kompozit szilárdságát és használatának maximális hőmérsékletét, emellett a kompozitok előállítási módja nagymértékben függ a mátrix anyagától. A fémmátrixú szemcsés kompozitokat az ipar számos területén hosszabb ideje használják. A beágyazott szemcsé lehet fém vagy kerámia (például a keményfémeknél 6–8% részarányban 0,8–5 μm átmérőjű volfrám-karbid vagy titán-karbid szemcséket kobaltba ágyazva). Előállításuk porkoházati eljárásokkal vagy folyadékfázisú szintereléssel történhet, és megmunkáló szerszámok vágóeleként használják őket (WIDIA®). A fémmátrixú szálak kompozitokban a fémes mátrixba más anyag (másik fém, intermetallikus vegyület, kerámia) szálait ágyazzák be. A fémmátrixú szálak kompozitok jellemzői a jó szívósság, a (polimermátrixhoz képest) magas működési hőmérséklet (300–650 $^{\circ}\text{C}$), a komponensek morfológiájának tág határok közötti változtathatósága a térfogatarány és az anyag megválasztásával. Az előállításuk bonyolult és drága technológiával történik, ezért előnyeik ellenére a gyakorlatban nem terjedtek el. A fémmátrixú kompozitok előállítása többféle módon történhet.

- Diffúziós kötés (diffusion bonding) kialakításával, melynek során tiszta fémfelületeket magas hőmérsékleten, nyomás alkalmazásával kapcsolnak össze. Ennek főbb lépései a szálakat megfelelő irányítottságban tartalmazó prekursorlapok (monotape rétegek) elkészítése, majd ezek meleg préselése (általában vákuumban).
- Porkohászati módszerekkel, amelynek főbb lépései a komponensek összekeverése, a formázás és az izzítás. Ez a módszer rövid erősítőszálak esetén is alkalmazható.
- Az in-situ módszer során szálak vagy lemezes eutektikumokat állítanak elő irányított megszilárdulással. A megszilárdulás körülményeinek és a komponensek koncentrációjának függvényében szálak vagy lemezes eutektikumok készíthetők.
- Az olvasztásos módszernél az olvadt állapotban lévő mátrixot hozzák össze a rendezett formában előkészített erősítőszálakkal, esetenként nyomás vagy vákuum alkalmazásával.
- A mechanikai alakítás során a komponenseket képlékeny alakítással (hengerlés, dróthúzás) egyesítik (például a Nb-Sn szupervezető kábelek előállításakor).

A fémmátrixú kompozitokat szerkezeti anyagként használják olyan helyeken, ahol a hőállóság és a szívósság egyaránt fontos (elsősorban a fémmátrixú szálak kompozitokat), jó példát szolgáltatnak erre a szálerősítéses könnyűfémek (pl. a szén- vagy bórszállal erősített alumínium). Gyakran használják ezeket a kompozitokat a jármű- és repülőgépgyártásban, a magas hőmérsékleten erős mechanikai igénybevételnek kitett alkatrészekhez (pl. alumínium-oxiddal erősített nikkal alapú szuperötvözetekből készült turbinalapátok).

A kerámiamátrixú kompozitok több szempontból különböznek a fém- vagy a polimeramátrixú rendszerektől. A polimeramátrix aránylag nagymértékben nyújtható és a repedés legtöbbször a szálban kezdődik, ehhez képest a kerámiamátrix maga nagyon rideg és a repedés ebben indul meg először. Erősítő anyagként leggyakrabban szilícium-karbidot, alumínium-oxidot, bór folytonos szálait vagy tűkristályait használják. A folytonos szálak készítésénél gyakran fém „magból” (pl. vékony volfrámszálból) indulnak ki, és annak felületére választják le a kerámiabevonatot a megfelelő vegyület gőzének termikus bontásával (pl. bórszál előállítása, szilícium-karbid szálak előállítása polikarboszilán termikus bontásával). A kerámiamátrixú kompozitok meleg préseléssel is előállíthatók, azonban ilyenkor a szálak egyenletes eloszlásának biztosítása nem egyszerű feladat. A kerámiamátrixú kompozitok gyakorlati felhasználásai a mechanikai tulajdonságok javítása fémszálakkal vagy rudakkal (pl. vasbeton), a beton lúgálló üvegszálakkal történő erősítése, magasabb működési hőmérsékleteken kerámia erősítőszál használata. A kerámiák kis sűrűsége önmagában is előny, ráadásul magas hőmérsékleten, esetenként erősen korrozív környezetben is megőrzik szilárdságukat (ezért használhatják például a gázturbinák egyes részeihez).

A szén-szén kompozitok a kompozitok különleges csoportját alkotják, ahol a mátrix és a szál anyaga is szén. Ezek a kompozitok egyesítik magukban a szénszálak nagy szilárdságát és modulusát a kerámiák hőállóságával. Egyes szén-szén kompozitok szilárdsága nem csökken, hanem (meglepő módon) növekszik a hőmérséklet növekedésével, és még 1000 °C felett is rendelkezhetnek további előnyökkel, például jó hővezető képességgel és kopásállósággal. Oxigén jelenlétében azonban már aránylag alacsony (400 °C feletti) hőmérsékleteken is reagálni kezdenek. Az oxidáció megakadályozására újabban különböző bevonatokat dolgoztak ki.

Előállításuk pirolízissel történik: a szénszálakat előbb műgyantába ágyazzák (infiltration), majd magas hőmérsékletre izzítják, aminek eredményeként szén marad vissza. Az átitatás és a termikus bontás többször ismételhető, így egyre nagyobb szilárdságú termék nyerhető. A szén-szén kompozitok gyakorlati felhasználási területei a fékbetétek (amelyek repülőgépeknél, versenyautóknál akár 1300 °C-ra is forrósodhatnak) és az űrtechnikai felhasználások (a visszatérő űreszközök orr-része, rakétafúvókák). Nagyon előnyös a szövetbarát tulajdonságuk, ezért implantátumok gyártására is használhatók.

Napjainkban a legelterjedtebb kompozitféleség a polimeramátrixú kompozitok, melyekben a mátrix anyaga hőre keményedő vagy hőre lágyuló polimer, az erősítőszálak pedig leginkább üveg- és szénszálak. A leggyakoribb kombinációk: üvegszál-polimer, szénszál-polimer, KEVLAR®-epoxy, KEVLAR®-poliészter. A hibrid kompozitokban két- vagy többféle erősítőszál is lehet azonos mátrixban. A polimeramátrixú kompozitok gyakorlati felhasználásai a fajlagos szilárdság növelését igénylő alkalmazások, a gépkocsigyártás, a háztartási eszközök előállítása, a sportszerek gyártása (pl. csónaktestek, sílécek, teniszütők, kerékpárok stb.). Előállításukra számos ipari eljárás létezik, a következőkben két példát vázolunk. A szálcsevéléssel hengersizmetrikus munkadarabok (csövek, tartályok) állíthatók elő. Az orsókon levő szálakat (kötegeket) gyantaolvadékon húzzák át és tekerceslik a megfelelő magra. A gyantát külön lépésben polimerizálják és a magot eltávolítják. Az eljárás előnye, hogy a gyantát tartalmazó tartály (resin bath) mozgatásának sebessége

változtatható, így a tekercselés sűrűsége a kívánt értékre állítható be. A húzásajtolás (pultrusion) az extrudálás speciális esete. A szálakat áthúzzák a gyantafürdőn és a megfelelő alakú szerszámon, majd a gyantát egy kályhában (curing oven) folyamatosan polimerizálják. Ezt az eljárást különféle rudak és idomok előállítására használják.

2.9. ábra - Szálcsévélés

2.10. ábra - Húzásajtolás

7. A kompozitokat érő terhelések

Az alkatrészek sérülései – így a kompozitból készülték is – alapvetően fizikai és kémiai okokra vezethetők vissza. Az első csoportba tartoznak a mechanikai, hő, elektromosság, sugárzás vagy időjárás okozta, míg az utóbbiba a vegyszerekkel kapcsolatos sérülések. A továbbiakban a mechanikai eredetű károsodásoknál a terhelések felvételében a beágyazó- és az erősítőréteg eltérő szerepet játszik, a szerkezet húzószilárdságát az erősítőszál mechanikai merevsége adja, mivel ez jóval nagyobb, mint a beágyazó anyagé. A nyomószilárdság érdekében a beágyazó anyag tapadási képessége és merevsége a számottevő, mivel a beágyazó anyag feladata, hogy az erősítő szálakat egyenesen tartsa, és megakadályozza azok deformációját, kihajlását. Hajlítás során a fent felsorolt három terhelés egyidejűleg lép fel. Terhelés során a külső rétegek húzásra és nyomásra vannak igénybe véve, miközben a réteg egymáshoz képest nyíródni. A nyíró igénybevétel a szomszédos rétegeket próbálja egymáson elcsúsztatni. Nyírás során a beágyazó anyag játssza a fő szerepet, ezért nemcsak jó mechanikai tulajdonságokkal, de a szálakkal való nagy adhézióval is rendelkeznie kell. Többrétegű kompozitok esetében a nyírással szembeni szilárdságok rétegek közötti nyírószilárdságnak (Interlaminar Shear Strength – ILSS) nevezik. Az ILSS szintén kulcsszerepet játszik a csavaró terhelések felvételében is, ezen felül azonban a csavarószilárdság jelentősen javítható a rétegrend megfelelő kiválasztásával.

Összetett anyagok esetében az alábbi tönkremeneteli formák léteznek:

szálszakadás (fiber break): akkor következik be, ha a fellépő húzás meghaladja a szál húzószilárdságát, általában erre méretezik az alkatrészeket. A tönkremenetek közül ez a legkedvezőbb, mert ez lehetővé teszi az erősítőszál szakítószilárdságának teljes kihasználását. Ha a kompozit a szálszakadás bekövetkezése előtt tönkremegy, az azt jelenti, hogy valamilyen hiányosság fedezhető fel a szerkezetben, mint például a túlságosan rövid szálak vagy az erősítőanyag és a mátrix közötti tapadás elégtelensége.

mátrixtörés (ply splitting): nyomás hatására a beágyazó anyagon belül repedések jelennek meg

szálkihajlás (microbuckling): akkor következik be, ha a nyomóerő mátrixtörést követően is fennmarad, és az erősítőszálak kihajlanak.

szálkihúzóadás: kis anyagvastagság esetén megnő a felületi nyomás (pl. furat mentén a palástnyomás hatására), ennek következtében fellágyul a mátrix, a gyanta folyáshatár fölé kerül, és ezt követően nem képes a terhelést a szálakra átadni.

Míg az előző tönkremenetek rétegen belül zajlanak le, addig a rétegelválás (delamináció) rétegek között megy végbe. A rétegekre merőleges irányú erőhatás következtében a rétegek közötti adhézió megszűnik, a rétegek elválnak egymástól. Ennek hatására a szerkezet szilárdsága jelentősen csökken. Közforgalmi repülőgépek egyik leggyakoribb sérülése a villámcsapás, mely szintén delaminációt okozhat. A tönkremeneteli formák szorosan összefüggnek egymással, nyomás általi szálkihajlás esetén a szálvégek közepén jellegzetes vonalak keletkeznek, ám szorosan kapcsolódik a mátrixtöréshez és a delaminációhoz is.

8. Ellenőrző kérdések

Anyagpárok szerint hogyan csoportosíthatjuk a kompozitokat?

A komponensek morfológiája szerint hogyan csoportosíthatjuk a kompozitokat?

A mátrix anyaga szerint hogyan csoportosíthatjuk a kompozitokat?

Mi a célja a szemcsés kompozitok kialakításának? Hogyan állíthatunk elő szilárd fémhabot?

Mi a célja a szálerősítésű kompozitok kialakításának?

A szálak és a mátrix között kialakított kötés erőssége milyen tulajdonságokat módosít?

Mi a szerepe a mátrix és a szál közötti határfelületnek?

Mi a célja a lemezes kompozitok kialakításának?

Hol alkalmaznak lemezes kompozitokat?

3. fejezet - A nanotechnológia és a nanoanyagok áttekintése

1. Bevezetés

A nanotechnológia név eredete a „törpe” jelentésű görög „nanos”, illetve latin „nanus” szó. Helyesebben hivatalosan 1960-ban rendelték a nano- előtagot (ún. prefixumot) az SI-mértérendszer mértékegységeihez a 10^{-9} szorzófaktor kifejezésére. Mivel a természettudományok közös marginális területeiről kinőtt, elsősorban az anyagtudományhoz sorolható új tudományág elsősorban olyan anyagi rendszerekre helyezi a hangsúlyt, amelynek hosszmeretei a nanométeres tartományba esnek, a makroszkopikus tudományoktól való megkülönböztetésül a nanotechnológia nevet kezdték használni.



The Scale of the Universe

3.1. ábra - A nanométeres mérettartomány

Az elmúlt 15 évben az új generációs fejlett technológiák előremozdították az anyagtudományi fejlesztéseket. A nanoanyagok számos tudományterületet érintenek, többek közt a kémiát, az elektronikát, a nagy sűrűségű mágneses adatrögzítési technikákat, a szenzorikát, a biotechnológiát. Napjaink kutatásainak kiemelt témája lett a nanotechnológia, így hihetetlen teljesítményekre lettünk képesek a nanoméretű anyagok tervezésében, szintézisében és szerkezeti kialakításukban.

3.2. ábra - A makroszkopikus, a mikroszkopikus és a nanoméretű tartomány összehasonlítása

Felmerül a kérdés, hogy miért fektetnek ekkora hangsúlyt a nanotechnológiára. Ennek elsődleges oka a nanoanyagok kiváló és páratlan optikai, elektromos, mágneses, biológiai vagy mechanikai tulajdonságaiban rejlik, melyek különleges potenciális alkalmazások előtt nyitnak utat. A tulajdonságokat a finoman hangolható nanoarchitektúra illetve nanostruktúra biztosítja, és ez fordítva is teljesül, a szerkezet finomhangolásával a tulajdonságok is rugalmasan változtathatók. Az eddig elért eredmények ellenére ezeknek az anyagoknak a szintézise és analitikája további jelentős kutatásokat igényel.

A híres fizikus, Richard Feynman, 1959. december 29-én, az Amerikai Fizikai Társaság Caltechben tartott ülésén kijelentette: „There's Plenty of Room at the Bottom”, azaz „Rengeteg hely van odalent”. Ezért a legendás mondataért sokan Feynmant tekintik a nanotechnológia előfutárának.

A múlt században alapvető változások történtek a tudomány és technológia terén, ami elsősorban a természettudományok és a műszaki tudományok összefonódását vonta maga után. Például a tranzisztor feltalálása (1948) forradalmasította az elektronikát és a számítástechnikát, majd bevonult a mindennapokba. A mikroelektronika kulcsfontosságú ipari ágazattá vált, azonban napjainkra a memóriachipek kapacitásnövekedése lelassult, fizikai és technológiai korlátokat ért el. Ez nemcsak az elektronikában volt megfigyelhető: a technológia számos más területen is korlátokba ütközött a kor műszaki színvonala támasztotta elvárásoknak való megfelelés. Az utolsó nagyjából 25 évben robbanásszerű miniatürizálás zajlott le a tudomány és a technika számos területén, beleértve a biológiát, a kémiát, a mikroelektronikát, a nagy sűrűségű adattárolókat, az optikát és az optoelektronikát, a szenzorokat és a fotonikát. A nanotechnológia kedvelt területei lettek a nanofabrikálás és a nanoműszerezés (ennek fő eszközei az AFM és az STM).

3.3. ábra - Irányvonalak az egyes tudományágak múlt- és jövőbeli karakterisztikus mérettartományaira vonatkozóan

3.4. ábra - A NASA nanotechnológiai kutatási tervezete

3.5. ábra - Egy új termék végső minőségének tervezéséhez a különböző mérettartományok és a köztük lévő kapcsolat alapos megismerése elengedhetetlen előfeltétel.

3.6. ábra - Valamennyi mérettartományhoz tartozó anyagféleség tulajdonságainak egyidejű ismerete garancia a mérnöki munka sikeréhez (modellezés, szimuláció, tervezés).

3.7. ábra - Elengedhetetlen a visszacsatolás.

3.8. ábra - Kulcsfontosságú lépések a kutatás-fejlesztés során.

2. Vizsgálati módszerek a nanotartományban

A nanoméretű anyagok sok nagyszerű változást és kutatási lehetőséget hoztak a fizika, a kémia, az anyagtudomány, a biológia és még számos tudományág területére. Fontos események játszódtak le a nanotechnológia „történelmében” a 80-as évek elején. Ekkorra épültek meg az első rutinszerű kutatási célokra használható pásztázó alagútmikroszkópok (scanning tunneling microscope, STM) és atomerő-mikroszkópok (atomic force microscope, AFM), amelyek elengedhetetlenek a nanoméretű anyagok vizsgálatához és manipulációjához. Ezek a pásztázó szondamikroszkópok (scanning probe microscopy, SPM) családjába tartozó eszközök lehetővé teszik az egyedi atomok és molekulák megfigyelését, valamint manipulációját szilárd felületeken. További technikák is elérhetővé váltak, így például a nyalábszondás mikroszkópia (beam-probe microscopy), a mechanikai szondás mikroszkópia (mechanical probe microscopy) és a részecskecsapdás mikroszkópia (particle trapping microscopy), melyek széleskörű kontrollálhatóságot biztosítottak. Ezzel párhuzamosan a számítógépes kapacitások ugrásszerű növekedése lehetővé tette a molekuláris szintű szimulációt a nanométeres mérettartományban. Ezek aztán tovább stimulálták a kutatásokat a molekuláris méretű eszközök (nanorobotok) kifejlesztésére.

Az új szerkezetek új tulajdonságokra mutattak rá, és egyben új alkalmazásokat is tettek lehetővé. Ezek vizsgálatához (sőt, sokszor maguknak a szerkezeteknek a kialakításához is) felbecsülhetetlen segítséget nyújtottak a már korábban is említett pásztázó szondamikroszkópok (scanning probe microscopy, SPM). Ezeknél az eljárásoknál egy fizikai detektáló eszköz segítségével térképeznek fel egy felületet valamilyen kölcsönhatáson keresztül. Magától értetődő módon ezek az eljárások a legritkább esetben tükrözik hűen a felület topográfiáját, ehelyett az alkalmazott kölcsönhatásnak megfelelő szempontból (elektromos, mágneses, hőmérsékleti stb. viszonyok) jellemzik azt. A szondamikroszkópos módszerek közé tartoznak a következő eljárások:

- Scanning Tunneling Microscopy (STM) – alagútmikroszkópia,
- Atomic Force Microscopy (AFM) – atomerő-mikroszkópia,
- Electrical Force Microscopy (EFM) – elektromos erő-mikroszkópia,
- Chemical Force Microscopy (CFM) – kémiaerő-mikroszkópia,

- Magnetic Force Microscopy (MFM) – mágneseserő-mikroszkópia,
- Near Field Scanning Optical Microscopy (NSOM) – optikai közeltér-mikroszkópia,
- Scanning Thermal Microscopy (SThM) – termikus pásztázó-mikroszkópia.

3. Szintetizálási módszerek

Az atomihoz közeli mérettartományban a korábbiakban megismert törvényszerűségek megváltoznak, ami újabb feladatok elé állítja a kutatókat, és emellett, hogy új technológiai megoldásokra van szükség, egyben újabb technológiai megoldások születését is kiváltja. A 100 nm-nél kisebb részecskék készítése és alkalmazása komoly kihívás mind a kutatóknak, mind a mérnököknek. Mérnöki szempontból ez a méret túl kicsi, emiatt a mikroméreteken rutinszerűen alkalmazott eszközök, módszerek már nem használhatók a nanométeres mérettartományban. Ugyanakkor a kémikusok szemszögéből (akik valójában „Angström-technológusok”) a 10 nm-nél nagyobb egységek túlméretesek. Még ha nagyobb molekulákkal (például fehérje-polimer) dolgoznak is, általában ezen belül 1–2 kötésre specializálódnak. Bár jelentős fejlődés következett be a szupramolekuláris kémiában, olyan szintetikus eszköztárra lenne szükség, amellyel biztosítani lehet nanostruktúrák rutinszerű szintézisét a kívánt méretben, alakban, kiralitással és funkciókkal. Minden ilyen irányú kutatás elején gondot jelent a szintézis módszerének kiválasztása, a kísérleti és szimulációs technikák alkalmazása, valamint az anyagok kiválogatása (fém, kerámia, polimer, szerves vagy szén alapú rendszer, kompozit stb.) A legfőbb kihívást talán az jelenti, hogy a végtermék tulajdonságai és gyárthatósága milyen kapcsolatban van a reaktánsok és prekursorok anyagi tulajdonságaival, illetve a szintézis körülményeivel.

A nanoméretű homogén vagy kompozit termékek igen sokfélék lehetnek. Készülhetnek egy vagy több kemikália felhasználásával, lehetnek megszilárdultak vagy aerogélek, felépülhetnek borított vagy adalékolt részecskékből. A szintézismódszerek lehetnek oldatból történő lecsapás, gázkondenzáció, kémiai eljárás, plazmaeljárás, égetés, spraypirolízis, szuperkritikusfolyadék-expanzió, polimerizáció, mechanikai „ledörzsölés”, molekuláris önrendeződés, hidrodinamikai üvegképzés stb.

Egyre nagyobb érdeklődés övezi a fém nanorészecskéket (amorf üveggel keverve), a nanokristályokat, a kvantumpöttyöket (más néven kvantumdotokat, azaz félvezető nanokristályokat), a fém/polimer részecskék kombinációkat. A nanorészecske-kutatás komoly hangsúlyt fektet manapság a nanorészecskék generálásának, gyártásának, jellemzésének és modellezésének tanulmányozására, a mágneses nanorészecskék vizsgálatára, a fém és kompozit részecskék tanulmányozására és az önrendeződő technikák vizsgálatára, továbbá a polimer részecskék, valamint a fém és fém/polimer kolloidális részecskék tulajdonságainak megismerésére.

A modern nanorészecske-kutatás néhány alapvető szempontja:

- nanorészecskék előállítása,
- individuális nanorészecskék vizsgálata és kezelése (manipulálása),
- két- és háromdimenziós anyagi struktúrák kialakítása, melyekben a részecskék szorosan jelentős kontrollálatlan aggregáció nélkül összeérnek,
- nanoanyagok kialakítása,
- eszközök miniaturizálása.

A nanoszerkezetek kialakítására két út áll rendelkezésre. Az első az ún. „top-down approach”, azaz a felülről lefelé haladó eljárás, mely gyakorlatilag a miniaturizációval egyenértékű. A méret csökkentésével körülbelül 10 nm-es méretig lehet eljutni, és nagy szerepet kap a litográfia. A másik módszer a „bottom-up approach”, azaz a lentől felfelé haladó, atomokból és molekulákból való „építkezés”. Ez utóbbi módszernek alapja az építőelemek mechanikai és elektromos sajátosságai, például az önrendeződő hajlam.

Az anyagi összetételtől függetlenül 100 nm alatt új tulajdonságok jelennek meg. Fontos kiemelni, hogy az optikai, elektromos, mechanikai, mágneses, kémiai stb. tulajdonságok a nanorészecskék alakjának, méretének és összetételének kontrollálásával szisztematikusan változtathatók. Ezért van komoly jelentőségük azoknak az analitikai eszközöknek és szintetizálási módszereknek, amelyekkel kézben tartható az ilyen méretű részecskék összetétele és morfológiája. Emiatt az vizsgálati és szintézismódszerek területén végzett kutatásokból fontos

előnyök származhatnak szinte az összes tudományterületen. Az alulról építkező módszer esetén két fő lépés különíthető el: az első lépés a nano-építőelemek szintézise (ez a könnyebb), majd a második lépés az így keletkezett blokkoknak az igény szerinti (kívánt tulajdonságú) összerendezése (ami sokkal nehezebb).

Az anyag vagy eszköz atomonként, molekulánként történő felépítése működőképes, csak túl sok időt igényel (például SWNT-szintézis). Emiatt szükséges egy önszerveződő eljárás, amely magába foglal önszerveződő, önalakuló, önkorlátozó jelenségeket, illetve képességeket, és segítségével nagyszámú nanostruktúra állítható elő egyidejűleg, atomi pontossággal, belátható időn belül. Ezeknek az eljárásoknak a kifejlesztése sokszor abba a korlátba ütközik, hogy az anyagok tulajdonságaihoz és az eszközök működéséhez használatos hagyományos modellek és elméletek fizikai mennyiségei 100 nm-nél nagyobb dimenziókra vonatkoznak. Ha csak egyetlen dimenzió is a kritikus hossz alá csökken az anyagi struktúrában, kiugró viselkedés jelentkezik, mely nem írható le a klasszikus fizika összefüggéseivel. A félvezető eszközök területén például kvantumhatások jelenhetnek meg (alagúthatás, diszkrét energia szintek), amikor az aktív réteg vastagsága 10 nm alá csökken. A szerkezetek dimenziójának csökkentésével juthatunk például különleges tulajdonságú szén nanocsövekhez, kvantumszálakhoz vagy -pöttyökhöz, vékonyrétegekhez, DNS-alapú szerkezetekhez, lézeremitterekhez.

4. A kvantumpöttyök

A kvantumpöttyök olyan anyagi részek (például félvezető anyagokban), amelyekben az excitonok mérete a tér mindhárom irányában lecsökkent. Ennek következtében ezek az anyagok a tömbi félvezetőkre és a különálló molekulákra jellemző elektronikai tulajdonságokhoz képest köztes jelleggel bírnak. Egyszerűen fogalmazva a kvantumpöttyök olyan félvezetők, amelyek elektronikai viselkedése szorosan függ az egyes kristályok méretétől és alakjától. Általában minél kisebb a kristály mérete, annál nagyobb a tiltotsáv-szélesség, azaz annál nagyobb az energiakülönbség a legnagyobb energiájú valenciasáv és a legalacsonyabb energiájú vezetési sáv között. Emiatt nagyobb energia szükséges a kvantumpötty gerjesztéséhez, és hasonlóképp nagyobb energia szabadul fel akkor, amikor a kristály visszatér az alapállapotba.

3.9. ábra - A nanopöttyök karakterisztikus mérettartománya

A kvantumszálakat, kvantumvölgyeket és kvantumpöttyöket általában kémiai módszerekkel vagy ionimplantációval előállított nanokristályokban, speciális epitaxiális technikákkal, vagy korszerű litográfiai technikákat alkalmazva nanoeszközökön belül alakítják ki.

A kolloidális félvezető nanokristályokat oldott prekursorvegyületekből, a hagyományos kémiai eljárásokhoz hasonló módon állítják elő. A kolloidális kvantumpöttyök szintézise a prekursorokból, szerves felületaktív anyagokból és oldószerekből álló háromkomponensű rendszeren alapul. Amikor a reakcióközeget kellően magas hőmérsékletre hevítik, a prekursorok kémiai módon monomerekké alakulnak. Miután ezek a monomerek elég nagyfokú túltelítettségi szintet értek el, a nanokristályok növekedése nukleációs folyamaton keresztül indul el. A növekedési folyamat során a hőmérséklet az egyik kritikus tényező, amely meghatározza a nanokristály-növekedés optimális feltételeit.

A nagy mennyiségű, konzisztens, kiváló minőségű nanopöttyök reprodukálható előállítási módjai közé tartozik a nanorészecskék kémiai prekursorokból, molekuláris klaszterek jelenlétében történő gyártása, olyan feltételek között, ahol a molekuláris klaszter integritása fennmarad, és előre gyártott sablonként szolgál a nanopötty számára. A klasztervegyület egyes molekulái nukleációs magokként funkcionálnak, amelyeken elindulhat a nanorészecskék növekedése. Ilyenkor nincs szükség a magas hőmérsékletű nukleációs lépésre a nanorészecskék növekedésének megkezdéséhez, ugyanis a molekuláris klaszterek már biztosítják az alkalmas nukleációs helyeket a rendszerben. Ennek a módszernek a komoly előnye a nagyfokú skálázhatóság.

A kvantumpöttyök energiaspektruma testre szabható a geometriai méret, az alak és az exciton-összesűrités mértékének módosításával. Az atomokhoz képest a kvantumpöttyök könnyen kapcsolhatók össze csatornává, ami lehetővé teszi az alagútspektroszkópiai alkalmazásokat. A kolloidális kvantumpöttyök egyik nyilvánvaló optikai tulajdonsága a színük. Ugyan a kvantumpötty anyaga meghatározza annak saját energiaszerkezetét, a tiltotsáv-szélességhez közeli energiákon a nanokristály kvantumhatárolt mérete sokkal jelentősebbé válik. Ezáltal bizonyos anyagú kvantumpöttyök más-más méretben eltérő színű fényt képesek kibocsátani. Ennek magyarázata a kvantumhatárolás (quantum confinement). Minél nagyobb a kvantumpötty mérete, annál vörösebb (kisebb energiájú) fényt képes kibocsátani. Ezzel szemben a kisméretű pöttyök kékebb (nagyobb energiájú) fényt bocsátanak ki. A fény színe közvetlen összefüggésben van a kvantumpötty energiaszintjeivel.

Kvantitatív szempontból a tiltotsáv-szélesség energiája határozza meg a fluoreszcenciafény energiáját (és ezáltal a színét), mely fordítottan arányos a kvantumpötty méretével. A nagyobb kvantumpöttyök több energiaszinttel rendelkeznek, melyek egyben sűrűbben is helyezkednek el. Ez teszi lehetővé a kvantumpötty számára a kisebb energiájú fotonok elnyelését, melyek a spektrum vörös oldalához közelebb helyezkednek el.

3.10. ábra - Különböző méretű kvantumpöttyekből felépülő kolloidális oldatok színekibocsátása

A kvantumpöttyöknek a nagy extinkciós koefficiensüknek köszönhetően különösen jelentős optikai alkalmazásai vannak. Az elektronikai alkalmazások során képesnek bizonyultak arra, hogy egyelektron-tranzisztorként működjenek, valamint Coulomb-blokádhatást mutattak. A kvantumpöttyöket egyben alkalmasnak tartják a kvantuminformaticai műveletek qubitjeinek megvalósítására is. A kvantumpöttyök méretének hangolhatósága előnyös számos alkalmazás szempontjából. Például a nagyobb kvantumpöttyök nagyobb eltolódást mutatnak a spektrum vörös oldala felé, mint a kisebb kvantumpöttyek, és kevésbé markáns kvantumtulajdonságokat mutatnak. Ezzel szemben a kisebb részecskék sokkal erőteljesebb kvantumhatásokat produkálnak.

A kvantumpötty-technológia egyike a szilárdtest kvantuminformatica legalkalmasabb jelöltjeinek. A kivezetésekre kis feszültségeket kapcsolva a kvantumpöttyökön átáramló elektronok ellenőrzés alatt tarthatók, ami a spinjük vagy más tulajdonságaik precíz mérésére ad lehetőséget. Több összekapcsolt kvantumpötty (vagy qubit) alkalmazásával, valamint a közöttük végrehajtható műveletek létesítésével kvantumműveletek hajthatók végre, és megvalósíthatók lennének a kvantumszámítógépek.

A kvantumpöttyek nagyérzékenységu sejtszintű képalkotásra történő alkalmazása nagy fejlődésen ment keresztül az elmúlt évtizedben. A kvantumpöttyek jobb fotostabilitása például lehetővé teszi több egymás utáni felvétel készítését a fókuszban, amelyek nagyfelbontású háromdimenziós képpé állíthatók össze. A kvantumpöttyek rendkívüli fotostabilitását kihasználó másik alkalmazás a molekulák és sejtek hosszabb időtartamú, valósidejű követése.

A kvantumpötty-mintákkal kapcsolatos egyik megoldatlan probléma a potenciális in-vivo toxicitásuk. Például a CdSe nanokristályok UV-megvilágításnál igen mérgezőek a sejt kultúrákra. Emellett igen keveset tudunk a kvantumpöttyök élő szervezetekből történő kiválasztásáról. Ezek és hasonló aggályok miatt a kvantumpötty-alkalmazások gondos vizsgálatra szorulnak, mielőtt vaszkuláris vagy tumorlekepezési alkalmazások során a humán klinikai gyakorlatba bevezethetnék azokat. Egy másik, kutatás alatt álló potenciális csúcstechnológias alkalmazás a kvantumpöttyöknek a szervetlen fluorofórként történő alkalmazásuk, amely lehetővé tenné a daganatok intraoperatív felderítését fluoreszcenciaspektroszkópia használatával.

A kvantumpöttyök segíthetnek a napjainkban jellemzően szilíciumból készült fotovoltaikus eszközök hatékonyságának növelésében és költségük csökkentésében. Számos kísérletet tettek arra, hogy a kvantumpöttyeket fénykibocsátó diódákként használják kijelzők és más fényforrások készítéséhez (QD-LED kijelzők, QD-WLED fehér fényű LED-ek). A kvantumpöttyek azért célszerű jelöltek a képernyőkhöz, mert esetükben a kisugárzott fény spektruma igen jellegzetes gaussi eloszlást mutat. Ennek eredményeképp olyan kijelzők készíthetők, amelyek sokkal pontosabban képesek visszaadni az emberi szem által érzékelt színeket. A kvantumpöttyek emellett igen kis teljesítményfelvételűek, ugyanis nem színszűrővel működnek. A hagyományos egykristályos kvantumpöttyrészecskéket kizárták a rugalmas szerves elektronikai alkalmazásokba építésből, ugyanis a növekedési feltételeik nem kompatibilisek a szerves félvezetők növesztéséhez szükséges folyamat paramétertartományaival. Ezzel szemben az oldatban előállított kvantumpöttyrészecskék szinte megkötések nélkül integrálhatók a hordozókhoz, és utólag más integrált áramkörök fölé is építhetők. Az ilyen kolloidális kvantumpöttyrészecskék potenciális alkalmazásokkal bírnak a hadiipar, a mesterséges látás, az ipari követéstechnika, a spektroszkópia és a fluoreszcencia orvosi biológiai képalkotás területén.

5. Ellenőrző kérdések

Mi a „nano-” prefixum eredeti jelentése?

Miért forradalmasítják az anyagtudományi fejlesztéseket a nanotechnológiai eredmények?

Mely tudományágak jelentősek a „nanovilágban”?

Milyen alkalmazások forradalma várható a nanotechnológia révén?

Milyen vizsgálati módszerek lehetnek segítségünkre a nanoméretű anyagok vizsgálatakor?

Milyen nehézségekkel jár a 100 nm-nél kisebb részecskék előállítása?

Milyen lehetőségeink vannak a nanoszerkezetek kialakítására?

100 nm alatt milyen új tulajdonságok jelennek meg?

Mi jellemzi a kvantumpöttyöket?

Hol alkalmazhatók a kvantumpöttyök?

4. fejezet - A nanokompozitok általános jellemzése

1. Bevezetés

Az anyagokkal szemben támasztott igényeket sokszor nem lehet egyetlen anyagfajtaival (fémekkel, kerámiákkal, polimerrel) kielégíteni, hanem különféle anyagok társítása szükséges. Míg a hagyományos kompozitokban a diszperz fázis (részecske, szál, lemez) jellemző mérete (átmérő, vastagság) a mikrométeres tartományba esik, addig ez a méret a nanokompozitoknál 2–3 nagyságrenddel kisebb. A szokásos meghatározás szerint a nanokompozitokban legalább az egyik komponens mérete legalább egy dimenzióban nanoméretű (azaz 10^{-9} m nagyságrendbe esik). A méretek csökkenése ez esetben is egyes tulajdonságok javulását vagy újfajta tulajdonságkombinációkat eredményezhet.

A nanokompozitok a természetben is megtalálhatók: ilyen szerkezetű például a kagylóhéj vagy a csont. A nanorészecskékben gazdag anyagok használata jóval megelőzte azok fizikai és kémiai természetének megismerését. Jose-Yacamán és munkatársai például rámutattak, hogy a maják kék festékének mély színét, valamint a savaknak és a biokorróziónak való ellenálló képességét ugyancsak a nanorészecskékhez kapcsolódó mechanizmusok biztosították. Az 1950-es évek közepétől immár rutinszerűen nanoméretű szerves agyagásványokat használtak a polimeroldatok folyási tulajdonságainak kontrollálásához (például a festékvizkozitás növelése érdekében) vagy gélek kialakításához (például kozmetikumok sűrítőanyagaként, mely homogén formában tartotta az összetevőket). Az 1970-es évekre a polimer–agyagásvány kompozitok már a tankönyvekbe is bekerültek, bár a „nanokompozit” megnevezést ekkor még nem használták szélesebb körben. Mechanikai tulajdonságaik tekintetében a nanokompozitok az erősítő fázis kivételesen nagy felület-térfogat arányának és/vagy kivételesen nagy hosszúság–szélesség arányának köszönhetően különböznek a hagyományos kompozitanyagoktól. Az erősítő anyag felépülhet szemcsékből (például az ásványok esetén), lapokból (ilyenek például az agyagásvány-síkok) vagy szálakból (például a szén nanocsövek esetén). A mátrix és az erősítő fázis(ok) közötti határfelület tipikusan egy nagyságrenddel nagyobb, mint a hagyományos kompozitok esetén. A mátrixanyag tulajdonságait jelentősen befolyásolja az erősítő fázis az érintkezési tartomány közelében. Az erősítő fázissal való nagy érintkezési felület egyben azt is jelenti, hogy viszonylag kis mennyiségű nanoméretű erősítő anyag is jelentős mértékben képes befolyásolni a kompozit makroszkopikus tulajdonságait. Például a szén nanocsövek adagolása növeli az elektromos vezetést és a hővezetést, más nanorészecskék javíthatják az optikai tulajdonságokat, a dielektromos jellemzőket, a hőtűrést vagy a mechanikai tulajdonságokat (például a merevséget, a szilárdságot, a kopásállóságot vagy az ellenálló képességet). A nanoméretű erősítő fázist általában feldolgozáskor diszpergálják a mátrixban. A hozzáadott nanorészecskék tömegszázalékos aránya a töltőanyagra vonatkozó alacsony perkolációs küszöb miatt igen kicsiny (0,5–5%-os nagyságrendű), különösen a leggyakrabban alkalmazott, szabálytalan alakú, nagy hosszúság–szélesség arányú töltőanyagok (például az agyagásványokra jellemző nanométeres vastagságú korongok, vagy a szén nanocsövekre jellemző nanométeres átmérőjű hengerek) esetén.

A nanokompozitok nagy változatosságot mutatnak a mátrix, a diszperz fázis anyaga, a határréteg összetétele, valamint a diszperz fázis alakja és architektúrája szerint. A diszperz fázis morfológiáját illetően elsősorban a szemcsés, illetve a rövid szálakat tartalmazó nanokompozitok kutatása és fejlesztése áll az első helyen (a nanoméretű erősítőszálakból ugyanis napjainkban nem készíthetők olyan hosszú szálak, mint például a hagyományos üveg- vagy szénszálakból). A nanokompozitok tulajdonságainak kialakításában döntő szerepe van a diszperz fázis és a mátrix közötti határrétegnek is, melynek vastagsága esetenként összemérhető a nanorészecskék méretével, illetve a közöttük lévő távolsággal. A határréteg összes térfogata az egész nanokompozit térfogatának jelentős hányadát alkothatja. A mátrix tekintetében jelenleg a polimermátrixú nanokompozitok kutatása és fejlesztése áll az érdeklődés középpontjában. Fő cél a mechanikai tulajdonságok javítása, elsősorban a szilárdság növelése a diszperz fázis segítségével. A fém- vagy kerámiamátrixú nanokompozitok lényegesen ritkábbak. A különböző nanokompozitokat világszerte nagy erővel kutatják. Számos anyag van a kutatás vagy a fejlesztés szakaszában, másokból már kereskedelmi termék lett. Elterjedésük számos műszaki és gazdasági tényezőtől függ. Az egyik kulcskérdés a diszperz részecskék (például szén nanocsövek) árának alakulása. Tudományos téren a szerkezet–tulajdonság kapcsolat számos kérdése vár még tisztázásra.

4.1. ábra - A nanokompozit-hibridek tulajdonságai.

2. Polimermátrixú nanokompozitok

4.2. ábra - A polimermátrixú nanokompozitok fejlesztési útvonalai.

A polimermátrixú nanokompozitokban a mátrix anyaga hőre lágyuló vagy hőre keményedő polimer, a diszperz fázis az eddigi gyakorlat szerint leginkább réteges szilikát vagy szén nanocső. A szén nanocsövek alkalmazása azért ígéretes, mivel ezek rugalmassági modulusa a legnagyobb (kb. 1,7 TPa) az ismert anyagok közül és a szálerősítés szempontjából fontos alaktényező, az átmérő és a hossz aránya (aspect ratio, „karcsúság”) ugyancsak kedvező. Érdemes összehasonlítani, hogy míg az egyfalú szén nanocsövek (SWCNT) átmérője 1–2 nm, hosszúságuk pedig 1–5 μm , a hagyományos kompozitokban használt rövid üveg- vagy szénszálak átmérője jellegzetesen 5–10 μm , hosszúságuk pedig 50–100 μm .

Szén nanocsöveket tartalmazó polimermátrixú nanokompozitok. Szén nanocsöveket tartalmazó polimermátrixú nanokompozitok ugyan még nem mondhatók széles körben elterjedtek, azonban már kaphatók kereskedelmi forgalomban. A szén nanocsövek kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, ugyanakkor nem könnyű a gyakorlati hasznosításuk. Különleges alakjuk az alkalmazások szempontjából kedvező, azonban a van der Waals-erők hatására a részecskék agglomerálódnak, és gömbszerű gubancok alakulnak ki. Nehéz a szén nanocsöveket homogenizálni, és az előállítás maximális hőmérséklete (a legtöbb polimer esetén) 250 °C. A polimerolvadék megszilárdulásakor jelentős térfogatcsökkenés következik be, amely belső feszültségeket kelt, és ez roncsolhatja a szén nanocsöveket. Fontos szerepe van a nanocsövek és a mátrix közötti határretegnek, ugyanis a nanocső és a mátrix között kialakuló kötés erősségének ismerete alapvető lenne a terhelés átadás mechanizmusának megértése szempontjából. Ugyan számos megfigyeléssel rendelkezünk, de ezekből jelenleg csak kevés általános következtetés vonható le. Annyi bizonyos, hogy a funkcionálisítás, illetve a kovalens kötések kialakítása csökkenti a mechanikai stabilitást.

Szerves-szervetlen hibrid kompozitok. A polimermátrix tulajdonságainak módosítása gyakran szervetlen vegyületek beépítésével történik. Ezek a kompozitok különlegeseek, mivel kémiai szempontból nagyon különböző szerves mátrix és szervetlen diszperz fázis társítása következik be. Szervetlen töltőanyagok (fillerek) régóta használatosak a műanyagok gyártásában a polimermátrix szilárdságának és szívósságának növelésére, a gyúlékonyság csökkentésére, vagy egyszerűen a költségek mérséklésére.

4.3. ábra - A Young modulus függése a töltőanyag térfogathányadától agyagásvány/nylon-6 nanokompozitban és hagyományos, üvegszál/nylon-6 kompozitban.

Az agyagásvány/polimer nanokompozit előnye kis mennyiségű töltőanyag esetén jelentős. A nagyobb mennyiségben bevitt töltőanyag a kompozit sűrűségét növel(het)i, a mátrix kedvező tulajdonságát, a rugalmasságot vagy az átláthatóságot leront(hat)ja, a kompozitot rideggé teheti. A kisebb térfogathányad az előállításnál is könnyebbé teszi, így tehát a diszperz fázis a hagyományos technológiákkal bekeverhető a polimerolvadékba (nagyobb mennyiségű töltőanyag ugyanis a polimerolvadék viszkozitását jelentősen megnöveli). Az agyagásvánnyal erősített nylon-6 nanokompozitok fejlesztésében és alkalmazásában a TOYOTA cég játszott úttörő szerepet a múlt század kilencvenes éveiben. Napjainkban több más gépkocsigyártó cég alkalmazza ezeket a nanokompozitokat egyes alkatrészekben.

4.4. ábra - A tiszta PMMA mátrix és 5 tömegszázaléknyi nanoméretű alumínium-oxid szemcsét tartalmazó nanokompozit nyúlási diagramja. A beszúrt ábra a törési felületet mutatja.

Polimermátrixú hibrid nanokompozitok. A diszperz agyagásvány-részecskék és a réteges szerkezetű szilikátok nagy jelentőséggel bírnak, jellegzetes képviselőjük a montmorillonit. Kristályrácsuk kétdimenziós rétegekből épül fel, melyek vastagsága 1 nm körül van, oldalirányú kiterjedésük a 30 nanométertől több mikrométerig terjed. Mindegyik réteg tetraéderesen koordinált Si atomokból (szilícium-dioxid tetraéderek) és oktaéderesen koordinált alumínium-hidroxid vagy magnézium-hidroxid síkokból áll. A rétegeket gyenge van der Waals-erők kötik össze, és közöttük kisméretű kationok találhatók, melyek nagyobb méretű szerves kationokra cserélhetők ki. Ennek következtében néhány nanométer vastagságú lemezek képződnek. A részecskék és a polimer közötti kölcsönhatás erősségétől függően háromféle szerkezet jöhet létre: (a) a hagyományos kompozitokra jellemző struktúra, melyekben az agyagásvány-részecske nem esik szét lemezekre, (b) a réteges szerkezet fellazul és a szilikátrétegek közé egy (vagy néhány) polimerréteg ékelődik be, ezt nevezzük interkalált elrendeződésnek, (c) erős kölcsönhatás is kialakulhat, és a lemezek egyenletesen oszlanak el a polimermátrixban, ennek neve delaminált elrendeződés. A delamináció során minden részecske több száz vagy ezer lemezre hasad szét. Ilyenkor azonos térfogathányad esetén is drámai módon megnő a szerves határfelület nagysága, erősen lecsökken a lemezek közötti távolság, és a szerves molekulák nagy részének szerves szomszédja lesz. Mindez már aránylag kis (5% vagy kisebb) térfogati hányad esetén is a mechanikai tulajdonságok jelentős javulását eredményezheti. Nagyobb térfogatarány esetén ez a tendencia nem folytatódik, és ugyanennél a mátrixnál nagy mennyiségű (48 w%) hagyományos üvegszál bevitelével a mechanikai tulajdonságok lényegesen jobban javíthatók.

4.5. ábra - Szén nanocsővel (a), korom és réz-klorid keverékével (b) és csak korommal (c) töltött epoxigyanta elektromos vezetőképessége a töltőanyag térfogati hányadának függvényében.

Sok esetben lényeges követelmény az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése, ezért a polimermátrixú kompozitok gyakorlati alkalmazásakor fontos szerepe lehet a kompozit elektromos vezetőképességének. Az elektromosan szigetelő polimermátrix vezetőképességét elektromosan vezető diszperz részecskék beépítésével lehet növelni. Ennek során a részecskék térfogatarányának növelésével többé-kevésbé összefüggő, elektromosan vezető, háromdimenziós hálózat hozható létre (perkoláció). A diszperz részecskék alakja – elsősorban a hossz/átmérő arány – döntő módon meghatározza, hogy milyen térfogathányadnál alakul ki összefüggő hálózat. Ezt a koncentrációt nevezzük perkolációs küszöbnek. A perkolációs küszöb függ a hossz/átmérő aránytól. A nagy alakarányú (aspect ratio) szén nanocsövek már aránylag kis térfogathányadban is háromdimenziós hálózatot képeznek, és a mátrix elektromos vezetőképességét jelentősen feljavítják. Jelenleg többféle olyan polimermátrixú kompozit kapható a kereskedelemben, melyek szén nanocsöveket tartalmaznak a vezetőképesség javítása céljából.

4.6. ábra - A nyúlási szilárdság és a Young-modulus összehasonlítása a nylon-6 mátrix, a legjobb nylon-6 4% tartalmú nanokompozit és egy hagyományos, nylon-6 mátrixban 48 w% üvegszálat tartalmazó kompozit esetén.

Égésgátlásra alkalmas nanokompozitok. Az új alkalmazási területek jelentős részénél – gépjárműgyártás, elektromos ipar, építőipar, védőruházat – alapvető követelmény a termékek csökkent éghetősége, esetleg teljes égésgátlósága. A különböző polimertípusok közül egyre inkább előtérbe kerülnek a poliolefinok.

3. Fémmátrixú nanokompozitok

A fémmátrixú nanokompozitok széles skáláját tanulmányozták az elmúlt évtizedekben. Egy különleges mikroszerkezet esetén, az amorf mátrixban kristályos részecskéket tartalmazó szerkezeti és mágneses anyagoknál kedvező eredményeket értek el. A lágymágneses nanokompozitok kutatása több mint 15 éves múltra tekint vissza. 1988-ban a HITACHI METALS Co. kutatói – nióbium és réz ötvözelemeket tartalmazó amorf Fe-Si-B szalagok részleges átkristályosításával – kifejlesztettek egy a korábbiaknál kedvezőbb tulajdonságú lágymágneses anyagot FINEMET® márkaneven.

4.7. ábra - A FINEMET® típusú nanokompozit mikroszerkezete bal oldal: a mátrix összetételének változása a Fe-Si kiválások környezetében jobb oldal: a részleges kristályosodás folyamata.

Hőkezelés hatására az amorf mátrixban nanoméretű Fe-Si kiválások alakulnak ki. A réz elősegíti a kristálycsírák keletkezését, a nióbium pedig gátolja a göcök növekedését. A FINEMET® különleges mikroszerkezetének köszönhetően kiváló lágymágneses tulajdonságokat mutat Ennél az anyagnál tapasztalták az eddigi legnagyobb permeabilitást és telítési indukciót (a különböző lágymágneses anyagok összehasonlítása az ábrán látható).

4.8. ábra - A permeabilitás és a telítési indukció kapcsolata néhány lágymágneses anyagsaládnál.

A telítési mágneszettség értékét tovább növelték cirkóniumalapú amorf ötvözetek részleges átkristályosításával, így jöttek létre a NANOPERM® (Fe-Zr-Nb-Cu) és a HITPERM® (Fe-Co-Zr-Cu-B) lágymágneses ötvözetcsaládok. A cirkónium nagy reakcióhajlama miatt előállításuk lényegesen bonyolultabb a FINEMET-nél, ezért kevésbé terjedtek el a gyakorlatban. A FINEMET ötvözetek sikere ráirányította a figyelmet a koercitív erő és a szemcseméret közötti összefüggés tanulmányozására a szemcseméret széles tartományában. A kutatások bebizonyították, hogy a különböző lágymágneses anyagok esetén a koercitív erő a szemcsemérettel maximumgörbe szerint változik. Míg a hagyományos lágymágneses polikristályos anyagoknál a koercitív erő nő a szemcseméret csökkenésével (a szemcsék átmérőjével reciprokosan), a nanométeres tartományban viszont nagyon meredeken (a szemcseátmérő hatodik hatványa szerint) csökken. Ezt az összefüggést sikerült elméletileg is értelmezni. Az amorf ötvözetek részleges átkristályosításával készített mágneses nanokompozitok a legkedvezőbb tulajdonságú lágymágneses anyagok közé tartoznak. Gyártásuk ipari méretekben folyik (gyártásukkal foglalkozik például a Vacuumschmelze GmbH és a HITACHI Metals Co). Ezeket az anyagokat főleg a néhány száz kilohertzes tartományban használják transzformátorként és egyéb induktív elemként. Hazánkban a MAGNETECH Hungaria Kft. gyárt induktív elemeket, importált alapanyagból. A Fe-Nd-B típusú keménymágneses ötvözetek tulajdonságait is sikerült speciális nanokiválások kialakításával javítani, de ezek alkalmazása nincs még olyan előrehaladt állapotban, mint a lágymágneses nanokompozitoké. Az amorf mátrixban nanoméretű kristályos kiválásokat tartalmazó mikroszerkezet előnyösnek bizonyult a mechanikai tulajdonságok szempontjából is. Inoe és munkatársai Al-Ni-Y, Al-Gd-Fe (általában Al-átmeneti fém-ritkaföldfém) ötvözetek részleges (20-30%) átkristályosításával az amorf mátrixban 3–10 nanométeres alumíniumkristallitokat alakítottak ki. Ezen speciális nanokompozitok szilárdsága, keménysége és kopásállósága lényegesen kedvezőbb volt, mint akár az egyfázisú amorf mátrixé vagy a hagyományos kiválásokon keményített alumíniumötvözeteké. Egyes tömbi amorf ötvözetek részleges átkristályosítása nanoméretű intermetallikus kiválásokat eredményez az amorf mátrixban. A módszer egyik változatánál további hőkezeléssel az amorf mátrixot teljesen átkristályosítják olyan mikroszerkezetűvé, mely 100–200 nm szemcséjű alumíniummátrixban 50 nm körüli szemcseméretű (kristályos) intermetallikus fázist tartalmaz. Az így létrejövő anyag szilárdsága 800–1000 MPa körül van (GIGASTM márkanév).

A nagyenergiájú mechanikai ötvözés a fémmátrixú nanokompozitok előállításának másik gyakran használt módja. Ilyenkor a fémes mátrixba (a fémrészecske belsejébe) nanoméretű kerámiaszemcsék építhetők be. Az örlés kezdetén a fém- és kerámiarészecskék a mikrométeres mérettartományba esnek. Az ütközések a fémes részecskékben képlékeny alakítást és törést eredményeznek, a kerámiarészecskékben ezzel szemben leginkább a törés dominál. A nagyenergiájú mechanikus ötvözés során a nanokompozit szemcsék úgy alakulnak ki, hogy a kerámiarészecskék mérete mindaddig csökken, amíg a részecske törési szilárdsága és az ütközések által okozott feszültség azonosra nem válik (az átmérő ilyenkor a néhány nanométer és a 100 nm közötti tartományban van). A keletkezett nanokompozit-szemcséket hagyományos porkohászati módszerekkel tömörítik.

4.9. ábra - Nanokompozit szemcsék kialakulása nagyenergiájú mechanikus ötvözéskor.

4. Kerámiamátrixú nanokompozitok

A kerámiamátrix általában nagy szilárdságú és nagy modulussal rendelkezik, azonban a kerámiamátrixú kompozitok fejlesztésénél nem annyira a szilárdság növelése, inkább a kerámiák hátrányos tulajdonságának, a ridegség csökkentése a cél. A hagyományos kerámiamátrixú kompozitokban jelentős mértékben sikerült a mátrix szívósságát növelni a mátrixhoz aránylag gyengén kötődő kerámia vagy fém erősítőszálak bevitelével. Felmerül azonban a kérdés, hogy a nanoszerkezetek kínálnak-e további fejlesztési lehetőségeket. Nyilvánvalóvá vált, hogy különféle mikroszerkezetek alakíthatók ki. Az eddig vizsgált rendszerekben a mátrix szemcsemérete a mikrométeres tartományba esik, és a rendszerre a diszperz fázis jellemző. A kerámiamátrixú nanokompozitok többfélék lehetnek: tekinthetünk (a) nanoméretű részecskéket mikrométeres mátrixban (mikro-nano kompozitok), illetve (b) nanorészecskéket nanoszemcsés mátrixban. Az első esetben a nanorészecskék elhelyezkedhetnek a mátrixszemcsék belsejében („intra” típus), a szemcsehatárokon („inter” típus) vagy vegyesen („intra-inter” típus). Lényegesen nehezebb olyan nanokompozitokat készíteni, amelyekben a kerámiamátrix áll nanoméretű szemcsékből. A mikro-nano típusú kompozitok körében leginkább a szilícium-karbid részecskék hatását vizsgálták, elsősorban alumínium-oxid és szilícium-nitrid mátrixban (hagyományos porkohászati módszerek használatával). Fontos szempontnak bizonyult a diszperz fázis homogén eloszlása, a részecskék agglomerációjának elkerülése. Egyéb használható előállítási módszerek a mechanikai ötvöztetés, a szol-gél eljárások.

4.10. ábra - A kerámiamátrixú nanokompozitok osztályozása: (a) nanoméretű részecskék különböző mátrixban (b) nanorészecskék nanoszemcsés mátrixban.

A vizsgálatok kevés általánosítható következtetést eredményeztek a mechanikai tulajdonságokat illetően: a szilárdság sok esetben jelentősen növekedett, a szívósság mérsékelten növekedett, a kopással szemben kifejtett ellenállás általában javult. A szilárdság változása több tényező együttes hatásaként jelenik meg: a diszperz fázis beépítésének hatására a mátrix átlagos szemcsemérete gyakran csökken, és ez önmagában is a szilárdság növekedését eredményezheti (Hall–Petch-effektus). Ebből a szempontból a mechanizmus hasonló, mint a hagyományos kompozitoknál. Jelenleg a kvantitatív modellek kidolgozása és az eredmények egységes értelmezése folyik. Sok vizsgálatot hajtottak végre a szén nanocsöveknek a kerámiamátrix különböző tulajdonságaira gyakorolt hatására nézve. A mechanikai tulajdonságok terén még sok a kérdőjel. Az elektromos vezetőképesség szempontjából egyértelmű összefüggés mutatkozott a beépített szénszálak térfogat arányával. Az elektromosan vezető szálakból háromdimenziós hálózat alakul ki (perkoláció), így áramvezetés mutatkozik már aránylag kis térfogathányad (< 5 tf%) esetén is. A vezetőképesség (σ) egyszerű hatványfüggvény szerint függ a szén nanocsövek térfogatarányától (ρ): $\sigma = k(\rho - \rho_t)^t$, ahol $t = 1,74$ és $\rho_t = 0,64$. Ez utóbbi érték a perkolációs küszöb. Az eddigi vizsgálatok biztatóak az elektromosan vezető kerámiamátrixú nanokompozitok fejlesztése szempontjából.

5. Ellenőrző kérdések

Mi a nanokompozit definíciója?

Milyen a nanokompozitokban az erősítő fázis felület–térfogat aránya?

A mátrix és az erősítő fázis(ok) közötti határfelület hogyan alakul a nanokompozitok esetében?

Mit nevezünk perkolációs küszöbnek?

Melyek a gyakoribb diszperz fázisok a nanokompozitokban és miért?

Hogyan változik a polimermátrixú nanokompozitok Young-modulusa a töltőanyag térfogathányadával?

Mi történik a polimermátrixú nanokompozitok esetén, ha a bevitt töltőanyag mennyiségét az ideálisnál nagyobbra választjuk?

Hogyan kerülhető el az elektrosztatikus feltöltődés a polimermátrixú nanokompozitok esetében?

Milyen jelentőséggel bírnak a fémmátrixú nanokompozitok?

Mi a kerámiamátrixú nanokompozitok készítésének fő célja?

5. fejezet - A nanokompozitok előállítása 1

1. A polimermátrixú nanokompozitok előállítása

A nanokompozitok olyan kompozitok, amelyekben legalább az egyik komponens legalább egy dimenzióban nanoméretű. Az erősítő (vagy más funkciót betöltő) anyagból általában csak 1–2%-nyit alkalmazunk, mivel méretüknél fogva a nanoanyagok fajlagos felülete nagyon nagy, így a határfelület mérete is nagy lesz.

5.1. ábra - A kompozitrészek áttekintése a Boeing 757-200 repülőgépek fő szerkezeti egységeiben. (Forrás: Boeing commercial Airplane company).

5.2. ábra - A kompozitrészek áttekintése az Airbus A380 repülőgépek fő szerkezeti egységeiben. (Forrás: Boeing commercial Airplane company).

A nanokompozitok esetén a határfelületi jelenségeknek sokkal nagyobb szerepe lesz, mint a kompozitoknál. Ugyanakkor sokkal nehezebb is lesz a töltőanyag homogén eloszlása a mátrixban, így sokkal inkább az in-situ előállítási módszerek kerülnek előtérbe. Kihívást jelent a megfelelő polimermátrix és nanorészecske kiválasztása (a kívánt alkalmazásnak megfelelően), a legmegfelelőbb előállítási mód megtalálása, valamint a részecskeagglomerátumok szétválásának, illetve kialakulásának megakadályozása.

Nulldimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok. Ezek olyan részecskék, amelyek mérete a tér mindhárom irányában a nanométeres mérettartományba esik. Az ilyen részecskék aggregálódásra hajlamosak – az aggregáció mértéke nagyban függ a részecskék méretétől. Minél kisebbek a részecskék, annál nehezebb elkerülni az összetapadásukat (ilyenkor a kompozit tulajdonságait ezek a másodlagos részecskék fogják befolyásolni). A szemcseméret és a részecskék között ható erők nagysága határozza meg az adhézió nagyságát. Mivel a klasszikus polimertechnikai megoldások nem lesznek megfelelők a nanorészecskék megfelelő eloszlásához, illetve a kialakuló agglomerációk megtöréséhez, új módszereket kellett kifejleszteni. Ilyen például a szilikarészecskék felületének módosítása. Ez történhet például oly módon, hogy γ -metakril-oxipropil-trimetoxi-szilánnal kezeljük a szilikarészecskék felületét, amely a felületi OH-csoportokkal tud reagálni. Ezzel gyakorlatilag a monomermolekulákat kötöttük meg a felületen, és a megfelelő iniciátor hozzáadásával a polimerizáció elindítható. Abban az esetben, amikor módosították a felületet, a részecskék agglomerációja sokkal kisebb mértékű, mint abban az esetben, amikor nincs felületmódosítás. Ennél a módszernél eredményesebb lehet az olyan eljárás, ahol a részecske szintézise és a polimermátrix kialakítása egyidejűleg történik. Példa erre a szilikarészecskék epoxi-amin mátrixban, szol-gél módszerrel történő előállítása. Ekkor biszfenol-A-diglicidil-étert, poli(oxipropilén)-diamint, tetraetil-ortoszilikátot és vizet kevernek össze, és toluolszulfonsav-monohidrátot tesznek hozzá mint katalizátort. A kompozitok homogenitása sokkal nagyobb az ilyen módon előállított kompozitok esetében, de részecskeaggregátumok kis mértékben itt is kialakulhatnak. Ezzel a módszerrel akár hangolt tulajdonságú anyagokat is elő lehet állítani.

5.3. ábra - A szén nanocsövek jellemző méretei.

Egydimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok – szén nanocsövek polimerben. Fejlesztésük nagy kihívást jelent, ugyanis ez az eddigi legjobb mechanikai tulajdonságú erősítő anyag (ha tökéletes egyfalú szén nanocső lenne). Fontos a nagy homogenitás, valamint az, hogy ne alakuljanak ki csököttegek és nagy felületen kötődjön a polimer a nanocsővel. Ugyanakkor több probléma is jelentkezik. Mindenekelőtt nagyon gyengék a szén nanocső és a polimer közötti határfelületi kölcsönhatások. Ehhez képest nagyon nagy a relatív felület, és a forgalomban kapható szén nanocsövek általában csököttegekké állnak össze. A szén nanocső esetében tehát a legfontosabb kritérium, hogy hogyan tudjuk úgy elválasztani az egyedülálló csöveket a kötegtől, hogy azok azután stabilan benne maradjanak a polimermátrixban és később másodlagos agglomeráció se következzen be.

A szén nanocső/polimer kompozitok előállítása két nagy csoportra oszthatók: a mechanikai módszerekre és a kémiai, fizikai módszerekre.

5.4. ábra - Egydimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok: nanoszálak, nanorudak, nanocsövek – átmérőjük jellemzően 100 nm alatti.

5.5. ábra - A tömbi és az adszorbeált fázis összehasonlítása szén nanocsöveknél.

Mechanikai módszerek a szén nanocsövek polimermátrixban történő elosztatására. Az ultrahangos homogenizálás a legáltalánosabban használt módszer a nanorészecske-diszperziók előállítása során. Az ultrahanghullámok egyedülálló csöveket választanak le a csökötegekről. Ez a módszer nagy hatékonysággal alkalmazható alacsony viszkozitású folyadékok (víz vagy etanol) esetén. A legtöbb polimer szilárd vagy viszkozus folyadék, így a viszkozitásuk csökkentésének érdekében hígítani kell azokat. Ha alacsony forráspontú oldószert választunk, figyelni kell az oldat hűtésére, mert az ultrahangos kezelés hatására felmelegszik az oldat. Ezenkívül maga a kezelés károsíthatja a csövek szerkezetét is. Az ultrahangos kezelés főleg laboratóriumi méretekben használható, egyszerűen alkalmazható művelet, könnyen tisztítható berendezéssel. A módszerhez megfelelő polimermátrix valamilyen oldható vagy alacsony viszkozitású polimer, oligomer, illetve monomer. A kimenetelt befolyásoló tényezők a szonikálás ereje, formája és ideje. Az eljárás során sérülnek a szén nanocsövek.

5.6. ábra - Ultrahanghullámok és hatásuk az anyagban.

A kalanderezés (hengerezés) olyan folyamatos alakítási művelet, amely során forgó hengerpár között alakítják az anyagot egyenletes vastagságúvá. A kalanderezés nagyon ígéretes módszernek tűnik a viszonylag jó diszperzitás elérésében. Fontos hogy megfelelő nagyságú nyíróerőt alkalmazzunk, hogy a csökötegeket szét tudjuk szedni, és a csöveket homogén módon el tudjuk oszlatni a polimermátrixban, de ne legyen túl nagy a tartózkodási idő, hogy a csövek ne törhessenek össze. Ugyanakkor a hengerek legkisebb távolsága kb. 5 μm , ami ugyan a szálak hosszával összemérhető, de az átmérőjüknél jelentősen nagyobb, így főleg azt tudjuk csak elérni, hogy a nagy agglomerátumok/kötegek kisebb kötegekként legyenek elosztatva, és mintegy mellékfolyamatként jelentkezik, hogy egyedülálló csövek is leválnak a kötegekről. A kalanderezéshez használt berendezés kezelése oktatást igényel, és tisztítása is nehézkes. A kalanderezés legtöbbször három érintkező hengerből álló rendszerben történik, melyek közül az első és a harmadik megegyező, a középső henger pedig az előző kettővel ellentétes irányba forog. A keverendő anyagot az első két henger közé vezetik be, ahol az elődiszpergálás során a középső henger aláára tapad, így az bevezeti a kalanderező második nyílásába. Itt az anyag eléri a kívánt diszpergálási mértéket. Az anyagot végül kések hasítják le a hengerről. A keverési ciklus többször megismételhető a maximális diszpergálás eléréséhez. A hengerek közötti állítható keskeny rések, valamint a hengerek eltérő forgási sebessége kis feldolgozási idők alatt nagy helyi nyíróerőket eredményez. A módszerhez megfelelő polimermátrix valamilyen folyékony halmazállapotú polimer vagy oligomer és monomer. A kimenetelt befolyásoló tényezők a forgási sebesség és a hengerek közötti távolság. Az eljárás során nem sérülnek a szén nanocsövek.

5.7. ábra - Kalanderezés.

A keverés jól alkalmazható a szén nanocsövek polimermátrixban történő elosztatására. Fontos a keverés sebessége, a keverőlapát alakja és mérete, ugyanis ezek határozzák meg a kialakuló diszperzió tulajdonságait. Többfalú szén nanocső elosztatására inkább alkalmas, mint egyfalú szén nanocső diszpergálásra. A keverés sebessége 10000 1/perc is lehet, mivel csak így kerülhető el a nanocsövek reagglomerálódása. A keverés főleg laboratóriumi méretekben használható, egyszerűen alkalmazható művelet, könnyen tisztítható berendezéssel. A módszerhez megfelelő polimermátrix valamilyen oldható vagy alacsony viszkozitású polimer, oligomer, illetve monomer. A kimenetelt befolyásoló tényezők a keverőlapát mérete, alakja, a keverés sebessége és ideje. Az eljárás során nem sérülnek a szén nanocsövek.

5.8. ábra - Keverés.

Az extrudálás kedvelt módja a szén nanocsövek polimerekbe keverésére, főleg a hőre lágyuló műanyagok esetében alkalmazható. A műanyag granulátumot és a szén nanocsöveket összekeverve adagolják az extrúderbe, ahol az extrúdercsigák gyors mozgásának köszönhetően nagy a nyíróáramlás, így a szén nanocső agglomerátumok jól tudnak keveredni a polimerolvadékkal. Ez az egyik legjobb módszer, ha nagy töltőanyag-koncentrációt szeretnénk elérni. Az extrudálás ipari méretben használható művelet, kezelése azonban oktatást igényel, és az extrúder tisztítása nehézkes. A módszerhez megfelelő polimermátrix valamilyen hőre lágyuló műanyag. A kimenetelt befolyásoló tényezők többek között a hőmérséklet, valamint a csiga alakja, illetve forgási sebessége. Az eljárás során nem sérülnek a szén nanocsövek.

5.9. ábra - Az extrúder felépítése.

Az őrlés (golyós malomban) könnyen kezelhető felszereltséggel dolgozik, használat után viszont azonnal tisztítani kell a malmot. A módszerhez megfelelő polimermátrix valamilyen polimer vagy monomer pora. A kimenetelt befolyásoló tényezők az őrlési idő, a forgási sebesség, a golyók mérete, illetve a CNT/golyó arány. Az eljárás során sérülnek a szén nanocsövek.

2. Kémiai, fizikai módszerek a szén nanocsövek polimermátrixban történő elosztatására

A szén nanocső/polimer kompozit tulajdonságai nagyban függenek attól, hogy milyenek a szén nanocső és a polimer közötti határfelületi kölcsönhatások. A nanocsövek falában található szénatomok a kötések aromás jellege miatt nagyon stabilak, pont ezért a szén nanocső inertnek tekinthető, és csak van der Waals-kölcsönhatások révén képes kölcsönhatásba lépni a mátrixszal. Úgy kell módosítani a szén nanocső felületét, hogy minél jobb határfelületi kölcsönhatásokat tudjunk létrehozni. Ezt kémiai funkcionálizálással, valamint fizikai módszerekkel tudjuk elérni. Ilyenkor kovalens kötésekkel kötünk funkciós csoportokat a szénvázhoz, azonban a csövek végeihez vagy a cső falához is lehet csoportokat kapcsolni. A direkt falfunkcionálizálás során az sp^2 szénatomok sp^3 szénatomokká alakulnak a folyamatban és a π -konjugáció is megszűnik a grafénrétegben. Ilyenkor reaktív anyagokkal, például fluorral kezeljük a szén nanocsövet, és így cserehelyeket alakítunk ki a felületen, ahol a fluoratomok helyére más csoportokat tudunk becsereálni, például aminocsoportokat, alkilcsoportokat vagy hidroxilcsoportokat. Nemcsak fluorral kezelhetjük a felületet, hanem például Diels–Alder- vagy nitrénaddícióval is tudunk funkciós csoportokat adni a felületre. A hibahely-funkcionálizálás során a hibahelyeket módosítjuk. Hibahelyek lehetnek például a cső nyitott végei, lyukak a falban, valamint a szerkezetbe épült öt- és hétszögek. Ilyen hibahelyek létrehozhatók oxidatív módszereket használva, például tömény savas (salétromsavas) vagy kálium-permanganátos kezeléssel. Ilyenkor karboxilcsoportok és hidroxilcsoportok jönnek létre a felületen, amelyek számtalan módon módosíthatók. Így tudjuk filizálni a felületet, és ezáltal sokkal több oldószerben diszpergálhatóvá tenni az amúgy teljesen apoláris szén nanocsövet. Az ilyen módon funkcionálizált szén nanocső erős határfelületi kötésekkel tud kialakítani a polimerekkel, így sokkal jobban érvényesülni tud a szén nanocső erősítő hatása a kompozitban.

A polimermolekulák kovalens kötéssel történő megkötésére két megközelítés létezik. A „grafting to” eljárás során a funkcionálizált nanocső felszínére előre legyártott polimermolekulákat kötünk meg. A polimermolekulának reaktív fejcsoporttal kell rendelkeznie (gyök is lehet), ez tud reagálni a nanocső funkciós csoportjaival. A módszer hátránya, hogy a sztérikus gátlás miatt csak limitált számú polimermolekula köthető meg, és csak reaktív fejcsoporttal rendelkező molekulák alkalmazhatók. A „grafting from” eljárás használatakor a nanocső felületére kicsi iniciátormolekulákat kötünk meg, majd a felületről indítjuk meg a polimerizációt. Ez utóbbi módszer előnye, hogy a sztérikus gátlás nem játszik szerepet, és nagyfokú polimerrel való borítottság érhető el. Hátránya ugyanakkor, hogy nagy odafigyelést igénylő módszer.

A kémiai funkcionálizálás (kovalens funkcionálizálás) hátrányai, hogy esetenként túl sok hibahely keletkezik, ami a szén nanocső fragmentálódásához vezethet, a π -elektronrendszer is felbomlik, így a mechanikai tulajdonságok, valamint az elektromos és hővezetési sajátságok is romolhatnak. Emellett az erős savak használata miatt nem környezetbarát a módszer. Olyan módszerek kidolgozására van tehát szükség, amelyek

olcsók, és nem károsítják a szén nanocsövek szerkezetét. Ilyen például a fizikai funkcionálzás (nemkovalens funkcionálzás).

A fizikai funkcionálás ugyancsak két alapvető módon történhet: a szén nanocső polimerrel történő beburkolásával, valamint a felületaktív anyagokkal történő funkcionálzással. A szén nanocsövet szuszpendáltathatjuk például polisztirolban, ilyenkor a polimer teljesen beburkolja a csövet, ún. szupramolekuláris szénnanocső-komplexet alkotva. Ebben az esetben a van der Waals-kölcsönhatások és az ún. π - π stacking az összetartó erő (mely a polimerek aromás gyűrűje és a szén nanocső fala között alakul ki). Ezzel szemben a felületaktív anyagokkal történő funkcionálzás során a felületaktív anyagok adszorpciója csökkenti a szén nanocső felületi feszültségét, így akadályozva meg az agglomerációt (az elektrosztatikus és szterikus taszítóerők miatt a tenzidekkel kezelt szén nanocsövek le tudják győzni a van der Waals-féle vonzóerőket). Például vízdoldható polimerek esetében (pl. PEG) kationos tenzidek (DTAB-dodecil-trimetil-ammónium-bromid), vízben nem oldódó polimerek esetében (pl. PP) pedig nemionos tenzidek (nonilfenol-etoxilát) alkalmazhatók

5.10. ábra - A kémiai és a fizikai funkcionálzás összehasonlítása.

A szén nanocső/polimer nanokompozitok előállítása

Oldatfázisban feloldjuk a polimert, diszpergáljuk az oldatban a szén nanocsövet. A terméket csapadékként kapjuk meg vagy ebből az oldatból különböző felületekre vékony nanokompozit filmeket is fel tudunk vinni.

Olvadékfázisban hőre lágyuló műanyagba keverjük bele a csöveket. Ennek a módszernek az az előnye, hogy nincs oldószer jelen. Magas hőmérséklet és nagy nyíróerő alkalmazásával keverik bele a szén nanocsövet a polimermátrixba. Az iparban ez az egyik legjobban alkalmazható módszer, viszont csak kis töltőanyag-koncentrációknál lehet alkalmazni, és a kompozit diszperzitása sem lesz olyan jó, mint az oldószeres módszer alkalmazása esetében.

In-situ polimerizáció esetén oldószeres vagy oldószermentes közegben a monomerhez adjuk hozzá a szén nanocsöveket, majd a homogenizálást követően elindítjuk a polimerizációt. A módszer előnye, hogy a funkcionálzott szén nanocső és a polimermátrix között kovalens kötés alakul ki. Így az erős határfelületi kötések miatt sokkal jobb mechanikai tulajdonságú kompozit állítható elő. Főleg epoxialapú polimereket alkalmaznak ebben az előállítási módban.

Latextechnológia. A latex különálló polimer részecskék kolloid, általában vizes diszperziója. Szinte mindegyik emulziós polimerizációval előállítható polimer alkalmas arra, hogy ilyen módon oszlassunk el benne szén nanocsövet. A már előállított polimersuszpenzióhoz adjuk hozzá az előzőleg felületaktív anyaggal stabilizált, jól diszpergált szénnanocső-suszpenziót. Ezután fagyasztva szárítást követő összeolvasztással kapjuk meg a nanokompozitot. A latextechnológia előnye, hogy könnyen kivitelezhető, általánosan alkalmazható, reprodukálható és lehetővé teszi a nagy viszkozitású polimerek használatát is a nanokompozitok előállításában. Az iparban is egyre inkább használt módszer.

Nagy szénnanocső-tartalmú CNT/polimer nanokompozitok előállítása

A sűrítés (densification) során szénnanocső-erdőket alkalmaznak. Az erdőt epoxigyantába helyezik, majd miután az epoxigyanta átáztatta a mintát, térhálósítják. A módszer használatával kontrollálhatóvá válik a szén nanocső térfogatszázalékos mennyisége, ráadásul a szén nanocsövek rendezettek lesznek a mátrixban. A szálfonás (spinning of coagulant) esetén felületaktív anyag segítségével diszpergált szén nanocsöveket használnak. Az előállítás során mikroszkopikus szénnanocső-köteget választanak le a folyamatosan kevert polimeroldatba (az eljárás angol neve wet spinning). Az eljárással szén nanocső/polimer kompozitszálak állíthatók elő, melyben a csövek nagyon jól rendezettek.

A rétegezés (layer-by-layer deposition) esetén oldószerben diszpergált szén nanocsöveket használnak. A kompozitot úgy állítják elő, hogy egy tárgylemezt (például mikroszkópos tárgylemezt) belemártanak a polimer/szén nanocső „oldatba”. A módszer segítségével magas szénnanocső-tartalom érhető el. További előny, hogy a polimer/szén nanocső fázis elválásaiból eredő szerkezeti hibák minimalizálhatók.

A porrá törés (pulverization) során nem kezelt szén nanocsőből indulnak ki. Tányéros malomban keverik össze és porítják el a polimer és a szén nanocső keverékét. Az eljárás segítségével lehetővé válik a szén nanocső és a polimer összekapcsolása, jól léptéknövelhető a technika, és nincs szükség oldószer használatára.

További egydimenziós nanorészecske/polimer nanokompozitra lehet példa a titanát nanoszál, mely erősítőanyagként funkcionálhat. A TiONT/polimer kompozit előállítása például a következő recept alapján történhet. Nagysűrűségű polietilén (HDPE) granulátumot és titanát nanoszálát Brabender gyúrógépben 170 °C-on, nagy fordulatszámon, 10 perc begyúrási idővel dolgozunk be. Az ömledékből ezután meleg préseléssel 200 °C-on, 30 bar nyomáson, 10 percen keresztül egy lapot préselünk, melyet aztán hideg préseléssel 25 °C-on, 110 bar nyomáson, 10 percen alatt szobahőmérsékletűre hűtünk. (J. Mater. Chem 17 (2007) 2351, J. Mater. Chem. 15 (2005) 4922).

3. Kétdimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok

A kétdimenziós nanorészecskék tulajdonképpen nanorétegek, melyeknél a rétegvastagság esik a nanométeres tartományba. Ilyenek például a vékonyrétegek, bevonatok, rétegszerkezetek. A kétdimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok közé tartoznak a rétegszilikátok (LDH). A rétegszilikátok körülbelül 1 nm-es rétegvastagságú réteges szerkezetű anyagok, ahol a rétegek egyéb méretei mikrométer nagyságúak. A rétegeken belüli izomorf helyettesítés miatt negatív hibahelyek találhatók, ezeket a rétegek között alkáli- vagy alkáliföldfém-kationok stabilizálják. A rétegek közötti kationok kicserélhetők. A kation méretének növelésével növelhető a rétegtávolság, és a kation anyagi minőségének függvényében (például valamilyen alkálifém végcsoportot tartalmazó kation esetén) megkönnyíthetik a polimernek a rétegek közé történő bejutását azáltal, hogy csökkentik a polimer felületi feszültségét.

A kétdimenziós nanorészecske-polimer nanokompozitok előállítása történhet in-situ polimerizációval. Az organofilizált szilikátok a monomerben vagy annak oldatában duzzadnak meg. A monomer bejut a rétegek közé, és ott polimerizálódik. A polimerizáció lejártszódhat hő, sugárzás vagy valamilyen iniciátor hatására. Előfordulhat olyan eset is, hogy az organofilizált szilikát önmagában nem exfoliálódik, azonban például maleinsav-anhidrid hozzáadásával javítható az exfoliálódás mértéke.

Az oldószeres módszerrel történő előállítás során a szintézishez általában poláris oldószert használunk (például toluol, DMF). Az oldószerben a szilikát megduzzad, ehhez az „oldathoz” adjuk hozzá a feloldott polimert, amely a megduzzadt szilikát rétegei közé tud ékelődni. Ezt követően elpárologtatjuk az oldószert. Ez az eljárás elsősorban HDPE és poliamid alapú kompozitok előállítására alkalmas módszer. Előnye, hogy kis polaritású vagy egyáltalán nem poláris polimer alapú nanokompozitok előállítására is alkalmas lehet, viszont az ipari alkalmazhatóságát a nagy oldószerigénye nem teszi kedvelt módszerré. Az ömledékes eljárás során az ömledékállapotban lévő, hőre lágyuló polimerbe keverik bele a szilikátot. Az iparban ez egyre közkedveltebb módszer, és extrudálással gyárthatók a nanokompozitok.

4. Felhasznált irodalom

Csanády-Kálmán-Koncza: Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába; J.H.Koo: Polymer nanocomposites; T.E. Twardowski: Introduction to nanocomposite materials; Horváth Endre: PhD-értekezés; Dr. Bánhegyi György: Nanokompozitok előállítása és alkalmazása; Dr. Lehoczki László: Nanokompozitok előállítása, szerkezete, éghetősége és alkalmazása; Science 290 (2000) 1331; Prog. Polym. Sci. 35 (2010) 357; Prog. Polym. Sci. 28 (2003) 1539; Polymer 40 (1998) 171; Polymer 43 (2002) 2909; Composites: Part A 41 (2010) 1345; J. Mater. Chem. 15 (2005) 4922; J. Mater. Chem. 17 (2007) 2351; Rom. Journ Phys. 50 (2005) 595; J. Appl. Polym. Sci. 92 (2004) 1771; Chem. Mater. 19 (2007) 2930

5. Ellenőrző kérdések

Mi a nanokompozitok definíciója? Milyen akadályokat kell legyőzni az előállításukkor?

Mit nevezünk 0D nanoszerkezetnek? Hogyan érhető el, hogy az eloszlásuk a mátrixban homogén legyen?

Mit nevezünk 1D nanokompozitnak? Miért ígéretesek a CNT erősítésű kompozitok? Mire kell figyelni az előállításukkor?

Melyek a CNT/polimer kompozitok előállításának két fő csoportja? Jellemezze őket röviden!

Hasonlítsa össze a mechanikai CNT/polimer kompozitok előállítási módszereit (mátrix, befolyásoló tényezők, sérül-e a CNT)!

Mit nevezünk a CNT funkcionálásának? Milyen fajtái vannak? Miért van rá szükség?

Mutassa be a CNT/polimer kompozitok előállítási módszereit!

Hogyan állítható elő nagy CNT tartalmú nanokompozit?

Hogyan állítható elő 2D nanoszerkezet/polimer nanokompozit? Hogyan érhető el, hogy javuljon a homogenitás?

Hasonlítsa össze az in-situ és az oldószeres előállítási módszert a rétegszilikát/polimer kompozitok előállítása esetén!

6. fejezet - A nanokompozitok előállítása 2

1. Fémmátrixú nanokompozitok előállítása

A kialakuló kompozit tulajdonságait nagyban befolyásolja az erősítő közeg mérete és a mátrix, valamint az erősítő anyag között kialakuló kölcsönhatás milyensége. A legjobb mechanikai tulajdonságok akkor alakulhatnak ki, ha finomszemcsés, termodinamikailag stabil kerámiarészecskéket homogén módon oszlatnak el a mátrixban. Azt azonban figyelembe kell venni, hogy a nanoszerkezetek előállítási költségei általában magasak, illetve maga a technológia is költséges és bonyolult lehet, amellyel a fémmátrixú nanokompozit előállítható. A nanométeres mérettartományba eső erősítő anyagok nagy felületi energiájuk miatt hajlamosan az agglomerációra, így nehéz egységes diszperzitást elérni a legtöbb előállítási módszerrel. Emellett arra is ügyelni kell, hogy esetenként a nanoanyagok a nagy felületi energiák és a felületdomináns tulajdonságaik miatt reaktívak lesznek a fémmátrixban. Például egy Al/CNT kompozitban az előállítási folyamat során alumínium-karbid fázis is keletkezhet, ami viszont ronthatja a kompozit anyag tulajdonságait. Olyan módszereket kell tehát alkalmazni vagy kifejleszteni, ahol ezek a negatív tulajdonságok kiküszöbölhetők. Előállítási módszerek például a porkohászat, a szórva leválasztás (spray deposition), a mechanikus rétegezés, a különféle bevonat-létrehozó technikák és a dermesztéses módszerek (solidification). Az erősítő anyagot olvadékként vagy por formában adjuk hozzá a mátrixhoz. Ha por formában adjuk az erősítő anyagot a mátrixhoz, a kiindulási anyag szemcsemérete határozza majd meg, hogy a kompozitban mekkora méretű lesz a részecske. Az is fontos hogy a mátrix nedvesítse az erősítő anyagot.

A nem egybefüggő erősítésű (discontinuously reinforced) fémmátrixú nanokompozitok megjelölése arra utal, hogy az erősítő anyag nanorészecskék összessége, nem pedig egy összefüggő tömbi anyag. Ilyenkor az erősítő anyag valamiféle részecske, tűkristály, esetleg kisebb szálak szerkezetek. Sok anyagféleséggel lehet erősíteni a fémmátrixot viszonylag olcsón, és olyan gyártási módszereket is sikerült kifejleszteni, amelyekkel reprodukálható módon elő lehet állítani a kompozitokat. A meglévő fémmegmunkálási módszerek szinte mindegyike alkalmazható a fémmátrixú nanokompozit előállítása esetében is. Az in-situ fémmátrixú kompozitok olyan anyagok, amelyekben előnyösen egyesül a kerámiák ridegsége és a fémek/ötvözetek képlékenysége. Az erősítés egy exoterm reakció folytán jön létre, amely elemek és/vagy vegyületek között játszódik le. Az előállítási módszernek köszönhetően a fémmátrixú nanokompozitok sokfélék lehetnek. Mátrix lehet az alumínium, a titán, a kobalt, a nikkel, a vas stb., erősítő anyagok lehetnek boridok, karbidok, nitridek, oxidok és ezek keverékei. A módszer előnyei, hogy az erősítő anyag termodinamikailag stabil formában keletkezik a mátrixban, erős határfelületi kötőerők lépnek fel és minél kisebb a részecskék mérete, annál jobb a mechanikai tulajdonságok. Példa egy alumíniummátrixú nanokompozit előállítására (Materials Science and Engineering A: 358 (2003) 99), 20% erősítőanyag-tartalom mellett: Al, TiO₂ és B port őröltek alkoholban, 8 órán keresztül golyós malomban, majd megszáritották, és 800 °C-ra melegítették (10 percig ott tartották), ezután 600 °C-ra való lehűlés után préselték (reactive hot pressing módszer), és végül extrudálták. A dermedéses módszer (solidification process) olyan eljárás, amikor az erősítőanyag részecskéi in-situ keletkeznek a fémolvadékból (korábban, magasabb hőmérsékleten szilárdulnak meg, mint a fém maga). A módszer egyszerű, gazdaságos és széleskörűen használható. Az alkalmazott körülmények hatással vannak a kialakult termék mikrostruktúrájára, és ezzel együtt a nanokompozit tulajdonságaira. A gyors dermedéses módszer (rapid solidification process) esetén nagyon gyors sebességgel (10⁵-10⁷ °C/s) hűtjük le a fémolvadékokat, gyakorlatilag megfagyasztjuk. A mikrostruktúra finomítását tudjuk elérni ezzel a módszerrel, ugyanis csökkenti az erősítő anyag méretét és módosítja az eloszlását a mátrixban.

6.1. ábra - Oxidkerámia-erősítésű fémmátrixú nanokompozitok.

2. Kerámiamátrixú nanokompozitok előállítása – réteges nanokompozitok

6.2. ábra - A ridegség szemléltetése.

A kerámiamátrix nagy szilárdságú, viszont rideg anyaga, így a cél a ridegség csökkentése. Eddig főleg olyan rendszereket vizsgáltak, ahol a mátrix mikrométeres méretű, míg a diszperz fázis a nanométeres tartományba esik, ezek az ún. mikro-nano kompozitok. A részecskék elhelyezkedhetnek a kerámiaszemcsékben („intra” típus), a szemcsehatárokon („inter” típus) vagy pedig vegyesen („inter-intra” típus). Létezik olyan eset is, amikor a kerámiamátrix a nanoméretű, de ezeket sokkal nehezebb előállítani. Főleg a SiC részecskék hatásával foglalkozik az irodalom Al₂O₃ és Si₃N₄ mátrixban, ezek előállításához hagyományos porkohászati módszereket alkalmaznak. Figyelni kell a diszperz fázis homogén eloszlására, az agglomerációk kialakulásának elkerülésére. A zsugorítást legtöbbször HIP (high isostatic pressure- minden irányban ugyanakkora nyomást alkalmazó) módszerrel végzik. Általában 1500-1600 °C hőmérsékleteket, 20-40 MPa nyomást és 5% körüli erősítőanyag-tartalmat használnak.

6.3. ábra - Kerámiamátrixú nanokompozitok.

6.4. ábra - Szén nanocsővel erősített kerámiamátrixú nanokompozitok törési felületei.

6.5. ábra - Grafénerősítésű szén nanocső.

3. Bevonatok

6.6. ábra - Bevonatok.

A bevonatok nanoszerkezetei három fő csoportba sorolhatók. A mindenkori atmoszférával érintkező határfelületek természetes és/vagy hőkezeléssel képződött nanoszerkezetű felületi (például oxid-) rétegek, illetve felületmódosító kémiai eljárásokon (önszerveződő rétegek, szol-gél eljárások, LB-technika) keresztül létrejött bevonatok. A „tömbi” belső szerkezetek, azaz a különböző technológiákkal előállított esetenként μm vastagságú heterogén szerkezetű bevonatok belső felépítése, szemcseszerkezete, esetleges kiválásai, kompozitáló ágensei. Ezen alkotóelemek nanoméretei új és az eddig ismerteknél jobb tulajdonságokhoz vezethetnek, például az elektrokémiai bevonatok (pulzáló elektrokémiai leválasztással létrejövő rétegek vagy pórusos anódos oxidrétegek) és a lézertechnológiával előállított bevonatok. A bevont anyag és a bevonat határfelületén keletkező nanoszerkezetek (a szilárd-szilárd interdiffúziós folyamatok nanoszerkezetű termékei, a fémolvadékban és a fémen lejátszódó folyamatok során kialakuló nanoszerkezetű rétegek).

A nanoszerkezetű anyagok szintézisének és felépítésének kritikus problémája az ellenőrzés módja. A különböző szintetizáló eljárások sokfélesége ellenére a technológiáknak két lényeges területet kell ellenőrizniük: a nanoklaszterek, részecskék, szemcsék, rétegek méreteit és összetételét (függetlenül attól, hogy aeroszol-részecskékről vagy pl. kvantumdotokról van szó), valamint a határfelületeket és ezeknek eloszlását a véglegesen kialakított, immáron összeépített anyagban (amennyiben az anyag tömbi terméként vagy bevonatként kerül majd alkalmazásra). Ez a két döntő ellenőrzési kényszer szorosan összefügg: lényegében a nukleáció és a növekedés szabályozásáról van szó. Az utóbbi meghatározza a felépített nanoszerkezetek kémiai, termikus és időbeli stabilitását, mechanikai és egyéb azon lehetőségeit, hogy miképpen valósulhatnak meg a viszonylagosan olcsó és „tömeggyártásra” alkalmas technológiák. Ezek az ellenőrzések csak az egyre nagyobb feloldású és érzékenységgű szilárdtest és felületvizsgáló eljárások segítségével valósulhatnak meg (TEM, XRD, AES, XPS, STM, AFM stb.).

Természetes és hőkezeléssel képződött oxidrétegek Több fémen már szobahőmérsékleten és szokásos atmoszférán egy öket a környezettől elhatároló, passzíváló felületi réteg jön létre. Ezek az általában nanoszerkezetű rétegek különböző felépítésűek és minőségűek. A fémek és ötvözetek oxidációja jellegzetesen heterogén reakció: a határfelületeken és egymást követő lépésekben következik be. A bruttófolyamat sebessége és mechanizmusa a határfelületen létrejött kémiai reakció sebességén kívül a reagensek utánpótlásának sebességétől is függ. Ez az utánpótlás diffúzió útján megy végbe. Az új fázis kialakulását befolyásoló tényezők

a fázis nukleációjának sebessége és a csírák, azaz a fázis továbbnövekedésének sebessége. Mivel egymás után következő folyamatokról van szó, az egész folyamat sebességét a legkisebb sebességi állandójú, tehát a leginkább gátolt részfolyamat határozza meg. A tiszta alumínium felületén szobahőmérsékleten egy ún. záróréteg, barrier jön létre, melynek vastagsága 1-2 nm. Nedves atmoszférában a rétegvastagság több hónap után a 10 nm-t is elérheti. A magnézium ötvöző, oxidképző hajlama erősebb az alumíniuménál. Már szobahőmérsékleten is jelentős mennyiség van belőle az alumínium szilárd oldatában, és az oldhatóság igen nagy mértékben fokozódik a hőmérséklet növelésével. Hőkezelés hatására már a alacsony hőmérsékletű hőkezelési szakaszban jelentékeny mennyiség épül be az amorf alumíniumoxid-rétegbe, majd ezt követi a kristályos oxidok megjelenése. Az amorf alumínium-oxid réteg 1D nanoszerkezetű réteg, a keletkező kristályos oxidok pedig 3D szerkezetű nanokristallitok.

Önszerveződő rétegek. Napjainkban az oldatokból önszerveződött mono- és multimolekulás rétegek szerkezetének vizsgálata igen jelentős kutatási irányzatot képvisel a felülettudományban. Az önszerveződő rétegek molekuláinak nagyfokú rendezettsége és szoros illeszkedése a fémfelületen számos gyakorlati alkalmazás útját nyitotta meg. A filmek befolyásolják többek között a felület nedvesítő képességét, tribológiai tulajdonságait, nanokeményiségét, valamint korróziós inhibitoroként viselkednek. A felület molekuláris manipulációjának célja továbbá olyan szupramolekuláris rendszerek készítése, amelyek elektronikus műveletekre alkalmasak (kapcsolás, egyenirányítás, erősítés molekuláris méretekben). A molekulák kémiai önszerveződése oldatfázisban egy spontán lejátszódó folyamat, mely során a szubsztátum felületén az önszerveződő molekulák oldatába merítéskor lejátszódó adszorpció és spontán szerkezeti rendeződés következtében a kialakuló felületi rétegek struktúráját nagyfokú molekuláris rendezettség jellemzi. Az önszerveződés a komponensek szupramolekuláris hierarchikus rendeződése. Fémek felületén kialakított önszerveződött monorétegek (SAM) szerves határfelületet képeznek, melynek tulajdonságai elsősorban a filmet képező molekulák végcsoportjának kémiai tulajdonságaitól függenek. Az önszerveződött monorétegek kiváló modellrendszerként biztosítanak a határfelületi folyamatok és a szerkezettulajdonság közötti összefüggések alapszintű kutatása számára, valamint lehetőség nyílik a felület szerkezeti és kémiai tulajdonságainak szabályozására, a határfelület tulajdonságainak (nedvesedés, kémiai reaktivitás, adhézió) tervezésére. A nagyfokú molekuláris rendezettség lehetővé teszi alkalmazásukat elektronikai, elektrooptikai készülékekben, nanotechnológiai eljárásokban, a rétegek tulajdonságainak egyszerű alakíthatósága felhasználható új piezoelektromos eszközök, nemlineáris optikák, kémiai és biokémiai szenzorok készítésénél. Az önszerveződött rétegek tömör és stabil szerkezetének köszönhetően számos korrózióvédelmi alkalmazásuk merült fel, mint például korróziógátló és tapadást növelő tulajdonságuknak köszönhetően átmeneti korrózióvédelem, felület-előkezelés festési eljárás előtt, valamint adalékanyagok környezetbarát bevonatrendszerekhez. Az önszerveződő molekulák korrózióvédő alkalmazására már történtek próbálkozások tiolszármazékokkal, amelyeknek gyakorlati alkalmazása toxikus hatásuk miatt korlátozott. Gyakorlati szempontból sokkal jelentősebb olyan környezetbarát vegyületek alkalmazása, melyek oxidál/hidroxidál borított fémfelületen képesek rendezett szerkezetű felületi rétegeket kialakítani. Környezetbarát vegyületeknek alkán-mono- és -difoszfonsavakat sikeresen alkalmaztak védőrétegek kialakítására fémfelületeken. A molekulák önszerveződésének egyik ígéretes alkalmazási területe az adhézió-növelő felületmódosítás festési eljárás előtt. Az önszerveződő molekulák egyik reaktív végcsoportja a fém felületével alakít ki kölcsönhatást, míg a másik végcsoport a szerves bevonathoz kötődik. Ezáltal a fém és a szerves bevonat között erős stabil kötés jön létre, így ez a felületmódosítási eljárás a kromát konverziós rétegek potenciális helyettesítő eljárásává válhat.

Az ún. szol-gél bevonatok és vékonyrétegek előállítása és felhasználási lehetőségeinek vizsgálata az elmúlt évtizedben került a felületkémiai kutatásokkal foglalkozó szakemberek érdeklődésének előterébe. Ezen típusú rendszerek szintéziséhez szükséges alapvető fizikai-kémiai és kolloidkémiai ismeretek ugyan nagyrészt már régóta ismeretesek voltak, „újrafelfedezésük” mégis elsősorban a nanotechnológia térhódításának köszönhető. Szol-gél eljárás alatt azt a műveletsort értjük, amikor a kialakítandó nanométer vastagságú bevonat alkotóelemeit, vagyis a kolloid mérettartományba eső (1-500 nm átmérőjű) részecskéket az ún. prekursorból kiindulva folyékony közegben állítjuk elő. A részecskék keletkezésének folyamata minden esetben két egymást követő lépésből áll: először a prekursor-molekulák hidrolízise következik be, majd ezt követően kondenzációs lépések eredményeképpen alakulnak ki a nanoméretű részecskék. Ennek eredményeképpen első lépésben egy stabil kolloid rendszert, azaz szolt állítunk elő. A második lépésben ebből a folyadékközegű rendszerből képezünk egy, még jelentős folyadékmennyiséget tartalmazó (nedves) réteget a bevonandó felületen. Ebből megfelelő szárítási és hőkezelési eljárásokat alkalmazva alakítjuk ki a bevonat végső állapotát, természetesen a tervezett alkalmazásnak leginkább megfelelő módon. A szol-gél eljárás alkalmazásának számos előnye van az egyéb vékonyréteg-előállítási technikákkal (például PVD és CVD módszerek) szemben, úgymint az egyszerű és költségkímélő megvalósítás, a kialakítandó rétegek egyszerűen és pontosan szabályozható vastagsága a réteggépzési műveletek ismétlése révén, a komponensek arányának és rétegbeli eloszlásának jól kézben tarthatóan szabályozhatósága, a rétegek egyszerű funkcionalizálhatósága különböző adalékok alkalmazásával.

Szilárd felületen Langmuir–Blodgett-eljárással is alakíthatunk ki nanorétegeket. Rendezett szerkezetű Langmuir–Blodgett-féle (LB) molekuláris rétegeket már több évtizede tanulmányoznak. Az LB- és az önszerveződött rétegek között a film kialakításában van lényeges különbség. Az LB-film létrehozásánál az első lépésben stabil monomolekulás Langmuir-réteget alakítunk ki filmmérlegben (egy mozgatható kar segítségével). A víz felszínén lévő, vízben nagyon rosszul oldódó molekulák helyigényét folyamatosan csökkentve hozzuk létre a rendezett szerkezetű szilárd fázist. Ekkor a levegő felé néző hidrofób láncok közti molekuláris kölcsönhatás rögzíti a láncokat és ezzel a réteget. Az önszerveződés során exoterm kemisorpció jön létre a molekulák és a szilárd hordozó közt, ezért a molekulák minden lehetséges helyet elfoglalva alakítanak ki egy rendezett, kristályszerkezetű molekuláris réteget. Az LB-rétegek egyre szélesebb körű alkalmazása válik lehetővé számos területen: a molekuláris elektronikától a biokatalizátorokon, a biológiai membránokat utánzó, levegőn stabil kettősrétegen kívül az illó anyagok detektálásáig. Az LB-kompozitok alkalmasak elektrontranszportra. Az LB-rétegek tanulmányozása lehetővé tette a levegő-víz határfelületen a biokémiai folyamatok modellezését és a termodeszorpció kvantitatív analizését. Az LB-filmek korróziós inhibitorokként történő alkalmazására is történtek kísérletek. A nanorétegek kialakítási körülményeivel és felhasználási lehetőségeivel az MTA KK-ban az elmúlt években intenzíven foglalkozunk. Egyik fontos vizsgálati terület a mikrobiológiai lerakódást és korróziót okozó mikroorganizmusok megtapadásának megakadályozása. Mikrobiológiai és felületvizsgáló kísérletek igazolták, hogy a mikroorganizmusok megtapadását üvegen az amfipatikus molekulából kialakított LB-rétegek gátolták, szénacélon a nitrogéntartalmú vegyületek lényegesen hatékonyabbak voltak, mint a foszfortartalmúak. Az újabb kísérletek a hidroxámsavakból kialakított LB-rétegek védőhatásának tanulmányozására irányultak. Elektrokémiai és felületvizsgáló módszerekkel (atomierő-mikroszkóp, pásztázó elektronmikroszkóp) megállapították, hogy a lánc hossz növekedésével az inhibíciós hatékonyság lényegesen nő. Ezzel párhuzamosan a részecskék mérete és a felület boritottsága is növekszik, a részecskék méreteloszlása élesen behatárolt. A rétegek számának növelésével egy optimális határig a hatékonyság is növekedett (ez molekulatípustól függően 5-9 réteg).

6.7. ábra - A Langmuir–Blodgett-eljárás elve.

A nanoszerkezetű anyagok előállítási technológiái közül kitűnik a nem egyensúlyi elektrokémiai eljárás, a pulzáló elektrokémiai leválasztás egyszerűsége és gazdaságossága. A fém- és ötvözetbevonatok pulzáló árammal történő leválasztásakor a nagy katódos áramimpulzusokat árammentes időtartamok szakítják meg. Ennél az eljárásnál a leválasztott réteg minőségét és szerkezetét az elektrolit összetételén és hőmérsékleten kívül az impulzus paraméterek is jelentősen befolyásolják.

A 90-es években fedezték fel a pórusos szilícium különböző (foto-, elektro- stb.) lumineszcens képességeit. Pórusos szilíciumot először 1956-ban anódos oldás és oxidáció segítségével állították elő. A szintén évtizedekkel ezelőtt korrózió-védelem céljaira kifejlesztett pórusos anódos alumíniumoxid-rétegek is reneszánszukat élik különös tekintettel a nanotechnológiák térhódítására. Ezeket az alumínium felületén elektrokémiai eljárásokkal kialakítható (és leválasztható) reprodukálhatóan szabályozható szerkezetű nanoléptékű textúrákat különböző nanogyártási célokra (membránok, kompozitok stb.) kívánják alkalmazni. Csakúgy, mint az anódos oxidrétegekben a szilícium pórusokba is katódosan vagy árammentes eljárással fém nanostrukturákat lehet kialakítani.

6.8. ábra - A dekorativitás céljából fémsókkal színezett, egyébként szintelen anódos oxidréteg pórusaiban a színezési időtől függő hosszban, a színező fém minőségétől függő, ~10 nm-es 2D fémkristallit nanoszálakat lehet előállítani.

Az új technológiák körének bővülésével – mindenütt, ahol fém hordozókon különböző fizikai vagy kémiai eljárásokkal bevonatokat képezünk, és eközben a hőmérséklet növekedésével is számolnunk kell, vagy nagy fajlagos felületű részecskék érintkeznek más anyagból való közeggel, például kompozitok előállításánál – bekövetkezhettek határfelületi reakciók és/vagy interdiffúziós folyamatok. A fenti technológiák különleges családját képezik az olyan bevonat-előállító eljárások, amelyek során egy magas olvadáspontú fémeket egy nála kisebb olvadáspontú fém olvadáskával vonunk be. Ilyen például az acél tűzizártó horganyzása. Az interdiffúzióval létrehozott határfelületi reakciókat csak akkor lehet biztonságosan reprodukálni, ha tisztázottakká válnak a reakciót szabályozó mechanizmusok, és adottak azok műszaki befolyásolási lehetőségei. Különböző magyarázatokat dolgoztak ki arra nézve, hogy egyes konkrét rendszerekben miért azok a fázisok jelennek meg, amelyek megjelennek, és miért nem azok, amelyekre a fázisdiagram alapján számítani lehetne. Nyilvánvalóan

tűnik, hogy adott konkrét nagyipari technológiáknál is meghatározók az egyes fázisok nukleációjának és növekedésének, továbbá leépülésének (adott esetben oldódásának) egymáshoz viszonyított sebességei. Egy évszázadok óta alkalmazott technológia esetében is találkozhatunk nanoszerkezetek kialakulásának mindmáig tisztázatlan bonyolult folyamatával. Ezek megismeréséhez napjainkban kiváló lehetőségek, vizsgáló technikák (keresztmetszeti TEM, FIB-SEM stb.) kínálóznak.

6.9. ábra - Al/Mn/Al/Mn/Al..... szobahőmérsékleten előállított vékonyréteg-rendszerében hőkezelés (300 °C, 1 óra) hatására végbemenő intermetallikus nanofázis (QC-Al₄Mn) képződése.

A lézersugaras bevonatképző eljárásoknál a nagyteljesítményű lézerrel megolvasztott fémolvadék a hagyományos mennyiségnél többszörös ötvözőmennyiségnyi fémeket képes oldani. Ezután a gyors lehűtést követően a nagy csíráképződési és kis növekedési lehetőség hatására kis méretű szemcsék és kiválások jönnek létre. Az ütési (SMAT, Surface Mechanical Attrition Treatment) technológia esetén egy 4-5 kg-os súly aljára erősített kb. 6 mm átmérőjű golyót ejtenek 2 m magasból egy szisztematikusan elmozduló tárgy felületére. Így a felületen egy több 10 nm-es, nanokristályos, plasztikusan deformált, nagy keménységű felületet állítanak elő.

6.10. ábra - Ötvöztelen, 1 mm vastagságú acéllemez. a) A felső acéllemez metszeti képe. b) Megolvadt porkeverék.

4. Felhasznált irodalom

Csanády-Kálmán-Koncza: Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába; Kaplan, Vishai: Processing and microstructural control of metal-reinforced ceramic matrix nanocomposites; P. Ajayan: Nanocomposite science and technology, Ch. 1, 2003; Kálmán, Csanádi, Magyar Tudomány, 2003 szeptember; Konczos Nanokompozitok c. jegyzete; Kun Péter, Diplomamunka, BME, 2012; Composites: Part B 37 (2006) 418; ACS NANO 4 (2010) 2003; Metallurgical and materials transitions A 29A (1998) 875; Bányászat és kohászati lapok 183/3 (2005) 39; Bányászat és kohászati lapok 144/2 (2011) 41; Chem. Mater. 11 (1999) 33; Top. Curr. Chem. 226 (2003) 91; Mat. Sci. Eng. A 358 (2003) 99; Nano Res. 4 (2011) 360; Carbon 48 (2010) 1743; Mat. trans. 44 (2003) 1919; J. Eur. Ceram. Soc. 17 (1997) 1061; Surf. Coat. Tech. 202 (2008) 5063; J. Am. Ceram. Soc. 81 (1998) 1453

5. Ellenőrző kérdések

Mit nevezünk fémmátrixú nanokompozitnak? Hogyan állítható elő? Mire kell figyelni az előállításakor?

Mit nevezünk nem egybefüggő erősítésű fémmátrixú nanokompozitnak? Hogyan állítható elő in-situ módszerrel? Melyek az előnyei ennek a módszernek?

Mutassa be a dermedéses és a gyors dermedéses módszert a nem egybefüggő erősítésű fémmátrixú nanokompozitok esetén!

Mit nevezünk kerámiamátrixú nanokompozitnak, milyen típusai vannak? Mutassa be az egyik típust, és soroljon fel irodalomból ismert példákat!

Melyek a réteges nanokompozitok?

Jellemezze az önszerveződő rétegek kialakulását!

Jellemezze a szol-gél és a Langmuir–Blodgett-módszereket, hogyan jelennek meg a rétegek előállításában?

Milyen elektrokémiai módszert ismer nanoréteg kialakítására? Mutassa be!

Milyen folyamatok vezetnek a határfelületi nanoszerkezetek kialakulásához?

Mutasson be olyan példákat, ahol a mátrix és az erősítő anyag is nanoszerkezetű!

7. fejezet - A nanokompozitok jellemzése és tulajdonságai 1

1. A vizsgálati eljárások főbb területei

A kémiai vizsgálatok legfontosabb feladata az anyagok vegyi összetételének megállapítása, de ide tartoznak a korróziós vizsgálatok is. A fizikai vizsgálatok célja az anyagok fizikai jellemzőinek (villamos vezetőképesség, villamos ellenállás, mágneses tulajdonságok, hőtágulás, fajhő, mechanikai tulajdonságok stb.) meghatározása. A szilárdsági vizsgálatoknál egyszerű mechanikai igénybevételekkel szembeni ellenállás megállapítása a cél. A technológiai vizsgálatok célja a legtöbb esetben az adott feldolgozási technológiára való alkalmasság eldöntése.

A vizsgálati módszerek az igénybevétel típusa szerint három csoportba oszthatók. A statikus igénybevételek esetén az igénybevétel időben állandó, vagy csak igen lassan, egyenletesen változik, dinamikus igénybevételnél a terhelés időben változik, hirtelen, ütésszerű, lökésszerű (például motorok indítása, ütközés), míg az ismételt igénybevétel (fárasztóvizsgálat) során az igénybevétel időben változik és sokszor ismétlődik. Annak függvényében, hogy a vizsgált minta a vizsgálat hatására tönkremegy vagy sem, megkülönböztetünk roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokat.

Az igénybevétel hatása szerinti beszélhetünk a teljes anyagtérfogatra ható igénybevételekről vagy a felületre ható igénybevételekről. A teljes anyagtérfogatra ható igénybevételek lehetnek húzó, nyomó, hajlító, nyíró, csavaró igénybevételek, a felületre ható igénybevételeket okozhatja hő, vegyi vagy elektrokémiai hatás, áramló közeg, koptató hatás, sugárzás vagy biológiai hatás.

7.1. ábra - Teljes térfogatra ható igénybevételek.

7.2. ábra - Felületre ható igénybevételek.

7.3. ábra - Az igénybevételek időbeli lefutása.

2. A szerkezeti anyagok viselkedése az igénybevételekkel szemben

A szerkezeti anyagok legfontosabb tulajdonsága, hogy ellenállnak a külső igénybevételekkel szemben, tehát terhelhetők. Az igénybevételek összetettek és különbözőek. A szilárdsági számítások során ezeket az összetett igénybevételeket jól definiálható alapesetekre, ún. egyszerű igénybevételekre vezetjük vissza, és ezek szuperpozíciójaként értelmezzük a szerkezet terhelését. Egyszerű igénybevételeknek tekintjük a húzást, a nyomást, a hajlítást, a csavarást és a nyírást. Az igénybevétel számszerű értéke a felületegységre ható erő, azaz a feszültség. Ha a feszültség a felületelemre merőleges, normál feszültségről, ha a felület síkjában hat, csúsztatófeszültségről beszélünk. Mértékegységeik a N/mm^2 vagy MPa, azaz a MN/m^2 . Az anyagok terhelésre adott válaszuk alapján lehetnek szívósak, képlékenyek vagy ridegek. A szívós vagy képlékeny anyagnál a törést jelentős mértékű maradó alakváltozás előzi meg, ami sok energiát emészt fel. A töretfelület szakadozott, tompa fényű. A rideg, nem képlékeny törés esetében a törést nagyon kicsi vagy elhanyagolható mértékű maradó alakváltozás előzi meg, és a repedés kialakulása után viszonylag kevés energiát kell befektetni az anyag eltöréséhez. A mechanikai anyagvizsgálati módszerek közé tartozik a hajlítószilárdság mérése, a rugalmassági modulus mérése és a keménységmérés.

A nanokompozitok esetén kihívást jelent a részecskék kis mérete, ezért akadályok merülnek fel az eddig használt technikák alkalmazásakor. Méretüknél fogva a nanoanyagok speciális technikákat igényelnek a vizsgálatuk során, új technikák kifejlesztésére van szükség.

A nagyszögű röntgendiffrakció (wide-angle X-ray diffraction, WAXD) az egyik leggyakrabban használt módszer a diszperzitás mértékének meghatározására a montmorillonit/polimer nanokompozitok esetében, amikor az agyagásvány rétegei közötti távolságot határozzuk meg. A mérés során a szórt röntgensugár intenzitását a diffrakciós szög és a mintaorientáció függvényében rögzítjük. A Bragg-diffrakció egyenlete szerint a konstruktív módon interferáló sugarak közötti útkülönbség: $\Delta s = n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\Theta$, ahol λ a diffraktálódó röntgensugarak hullámhossza (Å), $n = 1, 2, 3, \dots$, kis egész szám (általában n értékét 1-nek tekintjük), d az elhajlást okozó síksereg tipikus rácstávolsága (Å), valamint Θ a diffraktáló sík és a röntgensugár által bezárt szög, azaz a beesési szög pótszöge. Míg a kisszögű ($\sim 0^\circ$) röntgenszórás (SAXS) elsősorban a kolloid rendszerek, pórusos anyagok vizsgálatára alkalmas ($d \sim \text{nm} - \text{mm}$), a nagyszögű ($> 5^\circ$) röntgenszórás (WAXS) röntgenkristallográfiai és makromolekula-kristallográfiai célokra használható ($d < \text{nm}$). A diffrakciós mintázatból a mintában megtalálható kristályos fázisokról, és a minta szerkezetéről kapunk információt. A vizsgálati módszer nem roncsolja a mintát, és a minta-előkészítés sem bonyolult, főleg ezért közkedvelt vizsgálati módszer. A d rétegtávolságok változása alapján megmondható, hogy milyen típusú nanokompozit keletkezett: ha nincs változás, a polimer nem tudott behatolni a rétegek közé, ha a d értéke csökkent, akkor deinterkaláció, ha pedig a d értéke nőtt, interkaláció történt, végül ha a d értéke kívül került a nagyszögű röntgentartományon, akkor exfoliálódás következett be. A mérést befolyásoló tényezők a minta milyensége (por vagy tömbi anyag), a mérési paraméterek (a rés szélessége, az adatgyűjtési idő, a pásztázás sebessége), valamint ha rétegszilikátot vizsgálunk, fontos, hogy rendezett rétegek legyenek, ugyanis az amorf rendszereknek nincs röntgenmintázatuk. A módszerrel csak a rétegtávolságokat tudjuk meghatározni, arra nem kapunk semmilyen információt, hogy milyen az ásvány eloszlása a polimermátrixban.

7.4. ábra - A nagyszögű röntgenszórás.

A kisszögű röntgenszórás (Small-Angle X-Ray Scattering, SAXS) a röntgensugárzásnak a nanoméretű anyagok szerkezeti azonosítására használt analitikai alkalmazása. A mintát egy jól definiált, monokromatikus röntgensugárral sugározzuk be. Az eljárás mono- és polidiszperz rendszerek tanulmányozására egyaránt alkalmas. Monodiszperz rendszerek esetében információkat kapunk a részecske méretéről, alakjáról és a belső szerkezetéről. Polidiszperz rendszerek esetében méreteloszlások számolhatók, ha feltételezzük, hogy a részecskék ugyanolyan alakúak. A kisszögű röntgenszórás a 0,5–50 nm-es szerkezetek vizsgálatában alkalmazott módszer. Szerkezeti információkat szolgáltat például a diszpergált nanoporokról, proteinekről, vírusokról, DNS-komplexeiről, a térfogategységre eső katalizátorfelület nagyságáról, mikroemulziókról, folyadékkristályokról. A vizsgálatból kinyerhető információk a lamellatávolságok, a girációs sugár, a részecskeméret és -alak, valamint a minta egészére jellemző szerkezet.

3. Termoanalitikai módszerek

A termoanalitikai módszerek csoportjába azok az eljárások tartoznak, amelyek a minta valamely jellemzőjének megváltozását követik a hőmérséklet és az idő függvényében. A minta hőmérséklete mindeközben programozottan változik, és a mintát körülvevő gázatmoszféra is szabályozható. A termoanalitikai módszerek alapvetően tehát mindazoknak a kémiai folyamatoknak/változásoknak a tanulmányozását lehetővé teszi, amelyek melegítéssel vagy hűtéssel függenek össze (például hőbomlás, pirolízis, égés, fázisváltozások, kalorimetria). A termoanalitikai módszerek ezeket a vizsgálatokat kis mennyiségű mintán és nagymértékben automatizált módon teszik lehetővé. A termoanalitikai módszerek közé tartozik például a termogravimetria (TG/TGA/DTG, tömegváltozás a hőmérséklet függvényében), a differenciális termoanalízis (DTA/DSC, a hőáram vizsgálata a hőmérséklet függvényében, az „evolved gas analysis” (az illékony komponensek távozásának vizsgálata a hőmérséklet függvényében). Ezek közül a termogravimetria a legegyszerűbb és legalapvetőbb termoanalitikai módszer. A műszerben egy analitikai mérleghez kapcsolódik mechanikusan a minta, amely egy elektromosan és programozott módon hevített kemencében helyezkedik el (termomérleg). A műszer a tömegváltozást rögzíti a hőmérséklet függvényében. A pásztázó kalorimetria (DSC) azt az elektromos teljesítményt méri, amely ahhoz szükséges, hogy a mintát és a referenciaanyagot azonos hőmérsékleten tartsassuk. Méréstechnikai okokból ez pontosabb módszer, mint a differenciális termoanalízis (DTA).

7.5. ábra - Termogravimetria.

4. Mikroszkópia

A mikroszkóp elnevezése a „mikron” = kicsi és a „szkopein” = nézni szavak összetételéből származik, tulajdonképp a szabad szemmel láthatatlan tárgyak vizuális vizsgálataként definiálja a vizsgálati módszerek ezen családját.

Fénymikroszkópok. Az első mikroszkópok az 1600-as évek környékén jelentek meg. Az alapvető fénymikroszkópok az optikai leképezés elméletét használják: a mintán áthaladó vagy az arról visszaverődő fénysugarakat egy optikai rendszer gyűjti össze, és a segítségükkel nagyított képet szolgáltat. A leképezés (alapesetben) látható fény segítségével, optikai lencse használatával történik, a képet a szem, fotolemez vagy digitális képalkotó eszköz fogja fel, illetve rögzíti. A fényutak száma szerint beszélhetünk szimpla vagy binokuláris mikroszkópokról. A módszer korlátjai, hogy sötét vagy erős fényvisszaverésű vizsgálandó felületre van szükség, és a fókuszsíkból kieső pontok csökkentik a kép tisztaságát. Az összetett fénymikroszkópok maximális nagyítása nagyjából $1500\times$, elméleti felbontóképességük a diffrakció miatt 0,2 mikrométer. A speciális fénymikroszkópok közé tartozik az ultraibolya-mikroszkóp, az ultramikroszkóp, a fáziskontraszt-mikroszkóp, a lumineszcencia-mikroszkóp, a konfokális pásztázó mikroszkóp, a polarizációs mikroszkóp, a binokuláris mikroszkóp és a sztereomikroszkóp.

7.6. ábra - Egyszerű fénymikroszkóp.

Elektronmikroszkópia. Az elektronmikroszkópok sematikusan hasonló elven működnek, mint optikai analógjaik, azonban a leképezés fény helyett elektronnyalábbal történik. Az elektronmikroszkópok két fő típusa a pásztázó elektronmikroszkóp és a transzmissziós elektronmikroszkóp. Általánosságban elmondható, hogy az elektronmikroszkópia befogadja az analitikai módszereket. Az első transzmissziós elektronmikroszkópot (TEM) 1932–33-ban alkotta meg Knoll és Ruska. Ruska Nobel-díjat kapott érte 1986-ban. 1935-ben Knoll leírta a pásztázás elvét, és 1965-ben kereskedelmi forgalomba került az első pásztázó elektronmikroszkóp (SEM, Cambridge Instruments). 1939-ben megjelent az első analitikai módszer a TEM-ben, az elektrondiffrakció (Kossel és Möllenstedt). Elektron-besugárzáskor analitikára alkalmas jelek lehetnek például az energiát veszített primer elektronok, az Auger-elektronok. Hillier és Baker 1944-ben elektronenergia-vesztési spektrumot vesznek fel, az eljárást 1969-ben fedezi fel újra Wittry, Ferrier és Cosslett. 1951-ben Castaing megépíti az első mikroszondát, mely hullámhosszdiszperzív elektronsugaras röntgen-mikroanalízisre alkalmas berendezés. Az 1970-as évek elejétől energiadiszperzív mikroanalízis végezhető Si(Li) detektorral a pásztázó elektronmikroszkópokban. 1989-ben spektrális képalkotást hajtanak végre elektron-energiavesztési spektrometriával (EELS, Jeanguillaume és Colliex). Manapság a Zeiss felbontási rekordja transzmissziós elektronmikroszkópnál 0,08 nm (0,8 Angström).

A transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatoknál a minta előkészítés fontos mozzanata a vizsgálati módszernek. A mintának elég vékonynak kell lennie, hogy az elektronnyaláb át tudjon haladni rajta, tisztának kell lennie, ugyanakkor fontos, hogy lehetőleg ne sérüljön az anyag a minta előkészítés közben. Az előkészítés többféle módon történhet. Az ún. „ion-milling” során argonionokkal bombázzuk a felületet, így tesszük az elektronsugár számára transzparenssé. Az elektropolírozás olyan elektrokémiai maratás, ahol a feszültség, az áram, a hőmérséklet és az állandó keverés hatására a felületből kiemelkedő struktúrák gyorsabban maródnak le, mint a felület többi része – az eljárás célja a vágási élek lekerekítése és a fém felületének simává tétele. Az előbbi két módszer mellett szóba jöhet még a minta elporítása. A transzmissziós elektronmikroszkóp segítségével direkt képet kaphatunk a mátrixban eloszlott részecskékről (ezzel szemben a röntgendiffrakció csak szerkezeti információt ad). Manapság már atomi méretre képesek vagyunk látni az anyagot, és akár 1 nm-es felbontással is tudunk kémiai információt nyerni a részecskékről. Megfelelően fókuszált elektronnyaláb segítségével egy egyedülálló nanorészecske szerkezetére vonatkozó minden információt megkapunk. A transzmissziós elektronmikroszkópos felvételeken kivehető például, hogy az agyagásványok rétegei milyen mértékben távolodtak el egymástól, és azt is megmutatják ezek a felvételek, hogy milyen a mátrixban az erősítőanyag eloszlása. Hátránya a módszernek, hogy drága a berendezés. Emellett mivel a mikroszkóp nem tud rétegtávolságot mérni, viszonylag nehéz megállapítani, hogy interkalált agyagásványról van-e szó, vagy csak a polimer és az agyag keverékéről. Ahhoz, hogy teljesebb képet alkothassunk a kialakult nanokompozitról, mindenképpen több anyagvizsgálati módszert kell alkalmaznunk.

7.7. ábra - A transzmissziós elektronmikroszkóp.

7.8. ábra - Összefüggés a fókuszfolt mérete és a felbontóképesség között.

A pásztázó elektronmikroszkóp a pásztázó elektronsugarat a katód, megfelelő gyorsítófeszültség és elektronlencsék segítségével állítja elő, illetve fókuszálja a minta felszínére. Az elektronsugár hatására a preparátum felszínéről szekunder elektronok lépnek ki, amelyeket a detektor érzékel. A minta atomjaiban a kilépett szekunder elektron helyén maradt lyukat egy korábban valamelyik külső pályán lévő elektron tölti be, a köztük lévő energiakülönbség pedig karakterisztikus röntgensugárzás formájában sugárzódik ki. Ha a detektorhoz energiadiszipatív röntgendetektort (EDX-rendszert) is kapcsolnak, a kilépő karakterisztikus röntgensugárzás detektálásával következtethetünk a minta elemi összetételére is.

7.9. ábra - A pásztázó elektronmikroszkóp.

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat során nyerhető információk. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok során az anyag–elektron kölcsönhatások segítségével nyerhetünk információt: a különböző típusú kölcsönhatások mindegyikének megfeleltethető egy-egy mikroszkópos vizsgálati módszer. Megfelelő detektorok használatával a minta felőli oldalon észlelhetők a kölcsönhatásból származó másodlagos elektronok (secondary electrons, SE), a visszaszórt elektronok (backscattered electrons, BE), a keletkezett röntgensugárzás (X-ray) és a katódlumineszcens sugárzás (cathode luminescence, CL); a minta hátoldalán detektálhatók a diffrakciót szenvedett transzmittált elektronok (transmitted electrons, TE); továbbá a mintában maradt elektronokról ad tájékoztatást a mintaáram mérése (speciment current, SC). Az egyes módszerekre a későbbiekben részletesen kitérünk. A kis energiájú (<50 eV) másodlagos elektronok nagy számban lépnek ki a mintából, ezért ez a vizsgálati mód biztosítja a legjobb felbontást. A kilépő másodlagoselektron-áram keresztmetszete összemérhető a mintára eső elektronnyaláb területével, ugyanakkor csak kis mélységekről szolgáltat információt. A minta mélyebb régióiban keletkező másodlagos elektronok ugyanis kis energiájuk miatt még a mintából való kilépést megelőzően befogódnak, vagy a mintaáram kialakításához járulnak hozzá. A másodlagos elektronok spektrális összetétele (a visszaszórt elektronok energiaeioszlása) erőteljes rendszámfüggést mutat. Ily módon a másodlagos elektronok detektálása analitikai célokra is használható. A másodlagos elektronok detektálásával kapott kép kontrasztja azonban más információkat hordoz, mint a szokványos fénykontraszt. Az anyagban a másodlagos elektronok (a minta anyagának rendszámától függően különböző méretű) körte alakú térfogatot járnak be, és az elektronok ennek a térrésznek a szabad felszínéről tudnak a detektorba jutni. Vízszintes minta esetén a szabad felszín az említett körte alakú térfogat nyaka, azonban a ferde vagy függőleges felszínek elmetszik az elektronok által bejárt térfogatot, és ilyenkor a másodlagoselektron-áram sokkal intenzívebb. Végeredményben tehát a másodlagos elektronok detektálásával létrehozott kép kontrasztja a felület gradienséről tájékoztat. Ez a módszer tehát alkalmas az élek, tüskék, szálak kimutatására. A kis energiájú elektronok pozitív töltésű rács segítségével gyűjthetők be a detektáláshoz, így egyrészt azok az elektronok is észlelhetők, amelyek nem esnek a detektor látóirányába, másrészt nem túl mély gödrök belseje is tanulmányozható. A visszaszórt elektronok nagy energiájúak, és csak a detektor látóirányába eső elektronok észlelhetők. Ennek megfelelően a visszaszórt elektronok detektálásával árnyékjellegű, topográfiai kép áll elő: a kiemelkedések mögül induló elektronok nem jutnak el a detektorba, ami a képen kisebb intenzitást eredményez, míg a detektor felé mutató részekről induló elektronok világos területeket alakítanak ki. A visszaszórt elektronok mennyisége ugyancsak rendszámfüggő (ez azonban csak nagy térszögből történő elektronbegyűjtés esetén használható ki): a kép sötétebb területeinek megfelelő részek a kisebb rendszámú, míg a világosabb részek a nagyobb rendszámú anyagoknak felelnek meg. Az ún. Robinson-detektor helyzete állítható, ezáltal kis, illetve nagy térszögből egyaránt képes visszaszórt elektronokat begyűjteni. Előbbi, ún. kihúzott helyzete topográfiai, utóbbi, betölt pozíciója pedig anyagösszetételre vonatkozó vizsgálatokhoz használható. A visszaszórt elektronok nagyobb energiájúak, mint a másodlagos elektronok, így kisebb (általában csak μm -es) felbontást tesznek lehetővé, valamint inkább térfogati jellegű információt szolgáltatnak. A transzmittált elektronok az elektron–anyag kölcsönhatás mélységénél vékonyabb minták esetén detektálhatók. Az elektronok egy része ilyenkor szóródás nélkül, illetve egyszeri vagy többszöri szóródást elszenvedve átjut a mintán, és a minta hátoldala felől elhelyezett detektor segítségével észlelhető. A transzmittált elektronok homogén minta esetén az anyag vastagságeloszlásáról, egyenletes vastagságú kompozitanyagok esetén pedig a minta összetételéről szolgáltatnak információt. A képen a világos területek a vékonyabb, illetve kisebb rendszámú anyagból álló régiókat ábrázolják és fordítva. A transzmittált elektronok detektálása során legtöbbször (jórészt szénatomokból álló) kolloidumhártyára viszik fel a szénnél nagyobb rendszámú atomokból felépülő mintát. A transzmittált elektronok SEM segítségével történő tanulmányozása némiképp eltér a TEM-es módszerektől. Itt ugyanis a vizsgálat pásztázó természetű, és a kép intenzitásának kialakításában részt vevő elektronok száma (adott minta esetén) a detektor méretétől függ. A transzmittált elektronok segítségével előálló képek arról adnak tájékoztatást, hogy mennyi elektron abszorbeálódik az anyagban, illetve „reflektálódik” róla,

valamint mennyi hatol át a mintán. A kontrasztos, jó felbontású képhez nagy, jellemzően 30 kV-os gyorsítófeszültséget kell alkalmazni, mellyel akár μm -es mérettartományba eső minták is tanulmányozhatók. Mivel a másodlagos és a visszaszórt elektronok detektorai a minta ellenkező oldalán helyezkednek el, a transzmittált elektronokat érzékelő detektorokkal egyidejűleg is alkalmazhatók: a transzmittált elektronok ilyenkor a minta belső szerkezetéről, a másodlagos elektronok pedig a felületi struktúráról adnak tájékoztatást. A mintaáramkép kialakításában a mintában maradó elektronok vesznek részt. Tömbi minták esetén ezért a mintaáram tanulmányozása a BE- és a SE-módszerek kiegészítője lehet. Sima, élhatás nélküli minta esetén a SE-kép intenzitása konstans, a BE-kép a minta elemi összetételéről ad tájékoztatást, a mintaáramkép pedig értelemszerűen az inverz elemkontrasztot adja. A mintaáram tanulmányozása fontos eszköz a félvezetők tanulmányozása során, mert segítségével az elektromos szerkezeti folyamatok is vizsgálhatók. A belépő elektronok indukálta áram (EBIC, electron beam induced current) lényeges információt ad az elektromos sáv szerkezetéről, és segítségével a mikroelektronikai eszközök működése akár in situ körülmények között is tanulmányozható. A katódlumineszcencia vizsgálata során a látható és az infravörös tartományba eső lumineszcenciasugárzást detektáljuk. Ez a módszer különösen ásványok tanulmányozására használatos. A lumineszcencia során gerjesztés hatására az anyagban lévő külső elektronok gerjesztett állapotba kerülnek (félvezetőkben elektron–lyuk párok keletkeznek), és a relaxációt kísérő fénykibocsátás spektruma jellemzi az anyagok sávszélességét, összetételét, tisztaságát. Mivel a lumineszcencia intenzitása kicsi, nagy gyorsítófeszültségeket kell alkalmazni.

7.10. ábra - Elektron–anyag kölcsönhatás.

5. Felhasznált irodalom

Csanády-Kálmán-Koncza: Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába; J.H. Koo: Polymer nanocomposites T.E.Twardowski: Introduction to nanocomposite materials; Dr. Lehotzki László: Nanokompozitok előállítása, szerkezete, éghetősége és alkalmazása; Appl. Catal. B 125 (2012) 271; Sol. En. Mat. Sol. Cell. 82 (2004) 291; J. Sol-Gel Sci. Technol. 13 (1998) 499; Bertóti Imre: Röntgen fotoelektron spektroszkópia; ELTE Alkalmazott fizikai módszerek Laboratórium jegyzet, TEM; Dr. Mink János: Infravörös és Raman spektroszkópia alapjai; Bognár Eszter, BME, órajegyzet; Vihai Mittal, Characterization techniques for polymer nanocomposites, Wiley 2012; Dr. Tóth Zsolt – Égerházi László: A mikroszkópia alapjai (jegyzet); Pozsgai Imre A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai

6. Ellenőrző kérdések

Ismertesse a teljes térfogatra ható igénybevételeket!

Ismertesse a felületre ható igénybevételeket!

Csoportosítsa az igénybevételeket időbeli lefutásuk alapján!

Mutassa be a nagyszögű Röntgen-diffrakciót!

Ismertesse a Bragg-egyenletet, vezesse le az ábra segítségével!

Milyen információkat kapunk a diffraktorgram alapján, és melyek a befolyásoló tényezők?

Mutassa be a termogravimetriás analízist és annak alkalmazhatóságát nanokompozitok esetén!

Mutassa be a pásztázó kalorimetriát és annak alkalmazhatóságát nanokompozitok esetén!

Mutassa be a tanult mikroszkópiai módszereket és a segítségükkel nyerhető információkat!

Mutassa be a SAXS módszert!

8. fejezet - A nanokompozitok jellemzése és tulajdonságai 2

1. Energiadisziperzív röntgenspektroszkópia (EDS)

Karakterisztikus röntgensugárzás akkor keletkezik, ha a beeső nagyenergiájú elektron az atom egyik belső héjelektronjával ütközik. Értelemszerűen ez azt feltételezi, hogy a beeső elektronnak megfelelően nagy energiája legyen ahhoz, hogy a belső héjelektron kötési energiáját legyőzve ionizálja az atomot. A beeső elektron a kölcsönhatás után általában tovahalad egy kicsit más irányba. Az ionizáció miatt az adott atomban „elektronlyuk” keletkezik, mely az atomot instabillá teszi, és ebbe az elektronlyukba egy másik elektron ugrik. Ez a folyamat röntgenfoton kibocsátással jár, mely foton energiája a két elektronhéj kötési energiájának különbségével egyezik meg. A külső héjról beugró elektron a külső héjon szintén egy lyukat generál, melyet egy még külsőbb héjon tartózkodó elektron tölt be. Ez a folyamat addig folytatódik, míg a legkülső elektronhéjon is lyuk keletkezik. Az előbbieken leírt folyamatot karakterisztikus kaszkádnak is hívják, mely több meghatározott energiájú röntgenfoton kibocsátásával jár. A kilökött belső héjelektron általában elegendő energiával rendelkezik ahhoz, hogy további kölcsönhatásokat okozzon, és ezen kölcsönhatásokból is származhatnak további röntgenfotonok. A karakterisztikus röntgenfotonok energiája pontosan meghatározható, és ennek következtében a röntgenspektroszkópiát a különböző anyagokat felépítő atomok meghatározására lehet használni. A volfrám a nagy rendszáma miatt (74) viszonylag nagy energiájú karakterisztikus röntgenfotonok gerjesztésére alkalmas. A volfrámatom 74 elektronjából 2 a K-héjon, 8 az L-héjon, 18 az M-héjon, 32 az N-héjon, 12 az O-héjon és 2 a P-héjon helyezkedik el. A kötési energiák a fenti sorrendnek megfelelően 69,5 keV, 12,1 keV (L) 2,8 keV (N), 0,6 keV (N) és 0,08 keV (O). A lyukat betöltő elektron az atom bármelyik elektronhéjáról érkezik, természetesen minél távolabbi elektron tölti be a lyukat, annál nagyobb energiájú karakterisztikus röntgenfoton keletkezik. Így például a K-héj ionizációja során az L, az M, az N stb. héjakról is történhet elektronpótlás. Az L-héj ionizációja során az M, N, O héjakról történik az elektronpótlás. Ebből következően különböző energiájú karakterisztikus röntgenfotonok jönnek létre. Az egymással szomszédos elektronpályákról történő elektronpótlás kisebb energiájú röntgenfotonokat eredményez, mintha távolabbi energiahéjról származó elektron töltene be a lyukat. Fontos megjegyezni, hogy valójában csak a K-héjban történő elektronpótlásból származnak a diagnosztikában használható energiájú röntgenfotonok. Az L, M, N stb. héjakban keletkező karakterisztikus röntgenfotonok energiája túl alacsony ahhoz, hogy a diagnosztikai képalkotás során alkalmazni lehessen őket.

8.1. ábra - Energiadisziperzív röntgenspektroszkópia.

2. Pásztázó szondás mikroszkópok

A pásztázó szondás mikroszkópiai módszerek során a minta felszínét egy mechanikai, kvantummechanikai vagy optikai elven működő, pontszerű kölcsönhatásra képes egységgel, az ún. szondával pásztázzuk végig, és az egyes pontokban nyert információkból számítógép állítja össze a képet. A pásztázó szondás mikroszkópok előnyei, hogy valódi háromdimenziós leképezést hajtanak végre, a hagyományos mikroszkópok számára elérhetetlen, akár atomi felbontásra is képesek, használhatók ultranagy vákuumban, levegőben vagy vízben is, a képek feldolgozását komoly, eszközspecifikus szoftveres háttér segíti és viszonylag olcsó eszközök. A felszín leképezése legegyszerűbb esetben úgy történik, hogy a szonda és a minta közötti valamilyen kölcsönhatás alapján a piezoelektromos mozgatóegység állandó értéken tartja a szonda és a minta közötti távolságot, miközben a szonda laterálisan (x és y irányban) végigpásztázza a minta felszínét. A számítógép folyamatosan regisztrálja, hogy az állandó távolság biztosításához milyen mértékben kellett a mintára merőlegesen (z irányban) elmozdítani a szenzort, és ez alapján rekonstruálja a minta felszíni topográfiáját. A mozgatóegység angströmnyi pontossággal képes mozgatni a szondát vagy a mintát. Működésének alapja a piezoelektromos jelenség: ha bizonyos kristályokra feszültséget kapcsolnak, megváltoztatják méreteiket, így alkalmasak feszültségjelek igen pontos, kvantált mozgásokká történő átalakítására. Számos előnyük mellett azonban a piezoelektromos mozgatóegységekre mindig jellemző a nemlinearitás (azaz a feszültség–elmozdulás függvény nem, vagy csak bizonyos határokon belül lineáris), valamint a hiszterézis (a mozgatóegység nem tér vissza a kiindulási helyre, ha ugyanazon az úton oda-vissza vezérlik). A legtöbb pásztázó szondás mikroszkóp zárt szabályozási körben működik, azaz a topográfiát a fent leírt módon, a piezoegység függőleges mozgásából

határozza meg. A zárt szabályozási kör előnye, hogy a szonda nemlinearitása nem befolyásolja a mérést, ugyanakkor hátrányként említhető, hogy lassítja a mérést. A vezérlőegység a szonda függőleges mozgatása mellett a laterális pásztázó mozgás vezérléséért is felel.

A módszercsaládba tartozik többek között az atomierő-mikroszkóp, az elektrosztatikus mikroszkóp, a mágneseserő-mikroszkóp, az alagútelektron-mikroszkóp, az optikai közeltér-mikroszkóp. A pásztázó alagútmikroszkóp (scanning tunneling microscope, STM) esetén a szonda egy fémtű, a szonda és a minta közötti kölcsönhatás alapja pedig egy kvantummechanikai jelenség, az ún. alagúteffektus. Az elektron mint anyagi részecske – hullámtermészete következtében – bizonyos véges valószínűséggel olyan potenciálgáton (pl. két atom „között”) is áthaladhat, amelynek legyőzéséhez a klasszikus fizika szerint nincs elegendő energiája. Az áthaladás valószínűsége exponenciálisan csökken a potenciálgát magasságának és vastagságának növekedésével. Ha a potenciálgát egyik oldalán nagy mennyiségű elektron van, a véges valószínűség miatt jelentős számban kerülnek át elektronok a másik oldalra is. Az elektronok áramlása elektromos áramot jelent, ez az áram az ún. alagútáram. Mivel a fent említett exponenciális függés miatt az alagútáram igen erősen függ a szonda és a minta közötti távolságtól, a nanoamperes-pikoamperes alagútáram állandó értéken történő tartásához a tűvel igen pontosan kell követni a minta felszínét, így a felület topográfiája hűen leképezhető. Az STM segítségével akár atomi felbontás is elérhető, hátránya, hogy csak vezető minták vizsgálhatók a segítségével, és általában nagyvákuumban üzemel. Az STM leggyakrabban alkalmazott üzemmódjában (állandó áramú leképezés) a minta síkjában a tűvel pásztázó mozgást végzünk, miközben egy visszacsatoló hurokkal a tű felület fölötti magasságát úgy szabályozzuk, hogy a tű és a minta közötti, általában nanoamper nagyságrendű alagútáram állandó értéken maradjon. A tű így kialakuló háromdimenziós mozgása adja az STM képet. A megfelelő módon zajvédett (elektromos és mechanikai zajok szempontjából egyaránt) STM elegendően sima felületeken - pl. hasított egykristály - rutinszerűen képes elérni az atomi felbontást. Az atomierő-mikroszkóp (atomic force microscope, AFM) szondája egy rugólemeze erősített fémtű, mely hozzáér a minta felszínéhez vagy kis távolságban követi a minta felszínét. A minta és a szonda közötti kölcsönhatás a minta és a tű csúcsának atomjai közötti vonzás, melyre optikai úton a rugólemez lehajlásából lehet következtetni. A tű függőleges helyzetének folyamatos rögzítésével a minta topográfiai „térképe” készíthető el. Jelentős különbséget jelent a hasonló elven működő, hagyományos tűs profilométerhez képest a sokkal jobb laterális feloldóképesség, amely akár atomi méretek leképezését is lehetővé teszi, illetve a számos alkalmazható üzemmód, melyek különböző anyagi tulajdonságok megfigyelésére alkalmasak. Mivel a néhány nanométeres tartományban a makroszkopikus felszín fogalma már nem érvényes, a rögzítésre kerülő domborzat valójában egy ekvipotenciális felület, amely egyaránt hordoz magában topográfiai és anyagi jellemzőket. Ezek elkülönítése csak a készülék működési elvének, szerkezetének, valamint a tű és a felszín közötti kölcsönhatások alapos ismeretével lehetséges. Az AFM segítségével tetszőleges minta vizsgálható normál atmoszférikus körülmények között vagy akár folyadék alatt (ez utóbbi különösen biológiai minták vizsgálatakor előnyös). Felbontása és sebessége erősen függ az alkalmazott üzemmódtól és a vizsgálati körülményektől, azonban ideális esetben csaknem összemérhető az STM-mel. A pásztázó optikai közeltér-mikroszkóp (scanning nearfield microscope, SNOM) esetén a fény hullámhosszánál kisebb átmérőjű fénynyaláb pásztázza a mintát a felülethez olyan közel, hogy a távotér diffrakciós effektusai nem jelentkeznek. Ily módon a térbeli optikai felbontást csupán a szonda mérete korlátozza (a szokásos apertúra 100 nm), maga a diffrakció nem. A SNOM segítségével a SEM felbontásával összemérhető térbeli feloldást, de az optikai technika alkalmazása miatt információban gazdagabb képeket nyerünk. További előnye a módszernek, hogy a kis apertúrának köszönhetően kis teljesítménnyel is nagy fotonáram érhető el. A kis átmérőjű fénynyalábot „kihegyezett” optikai szállal vagy átfúrt AFM-rugólemez segítségével hozzák létre. A kémiaierő-mikroszkópia (Chemical Force Microscopy) az atomierő-mikroszkópia (AFM) speciális esete. Ilyenkor a tűt olyan kémiai anyag monorétegével vonják be, amelyet a vizsgálandó felülettel reakcióba akarnak hozni, és a kémiai kölcsönhatás következtében megváltozó adhéziós erőket mérik. Speciális pásztázó szondás berendezés például a pásztázó akusztikus mikroszkópia (SAM), mellyel roncsolásmentes módon kimutathatók a röntgennel láthatatlan hibák (például rétegeltválások (delamináció), törések, zárványok műanyagokban).

8.2. ábra - Atomierő-mikroszkópia.



8.3. ábra - Kémiaierő-mikroszkópia.

3. Egyéb vizsgálati módszerek

4. A nanokompozitok mechanikai tulajdonságai

A kompozitképzéssel javulnak a húzó-, nyomó- és ütési tulajdonságok. A nanokompozitok rugalmassági modulusa majdnem kétszerese a mátrixul szolgáló polimerének, ami a makromolekulák közötti jobb kölcsönhatásnak köszönhető. Emiatt a nanokompozitok nem törékenyek, ami hagyományos töltőanyagok használatának (pl. üvegszálas anyagoknál) gyakran előfordul.

8.4. ábra - A hagyományos és a nanoméretű töltőanyagok tulajdonságainak és teljesítőképességének összehasonlítása.

8.5. ábra - Al_2O_3 nanorészecskékkel töltött PP minták Young-modulusa, húzószilárdsága és ütésállósága a töltőanyag-tartalom függvényében.

Jól látható, hogy mindkét jellemző növekszik a nanorészecskék hozzáadásával, sőt, elméleti számításokat elvégezve az is kiderült, hogy a modulus növekedése nagyobb annál, mint amit egy kontinuum-mechanikai modell alapján várni lehet. Ez valószínűleg azzal áll kapcsolatban, hogy a nagy fajlagos felület miatt a mátrix nagyobb része az ún. határfelületi zónában található, amelynek fizikai tulajdonságai eltérhetnek a nem perturbált mátrixétól. Ezt fokozhatja a szilán kapcsolóanyagok használata is, amelyek elősegítik a mechanikai terhelés átvitelét az egyik fázisról a másikra. A húzószilárdság (az erő-nyúlás görbe helyi maximuma) ugyancsak nő a nanorészecskék hozzáadásával, ami az erős kölcsönhatásról tanúskodik, ugyanis az egymásról könnyen leváló fázisok jelenlétében a kompozitok húzószilárdsága általában inkább csökkenni szokott.

A szabványos Izod ütésállóság mellett meghatározták a kvázisztatikus és a dinamikus körülmények között mérhető fajlagos ütőmunkát is. A dinamikus körülmények között (3 m/s) valamennyi esetben rideg mechanizmus szerint törték a próbatestek. Látható, hogy az Izod ütésállóság valamit javult a töltőanyag hozzáadására, 1,5% töltőanyag esetében mintegy 25%-kal. Hasonló viselkedést mutat a dinamikus körülmények között meghatározott érték is, a kvázisztatikus körülmények között mért érték azonban gyakorlatilag független marad a töltőanyag-tartalomtól.

8.6. ábra - A Young-modulus függése a töltőanyag térfogat hányadától agyagásvány/nylon-6 nanokompozitban és hagyományos, üvegszállal erősített nylon-8 kompozitban.

Az agyagásványt tartalmazó nanokompozit előnye a kismennyiségű töltőanyag esetén nyilvánul meg. Esetenként ez nagyon fontos lehet, hiszen a nagyobb mennyiségben bevitt töltőanyag a kompozit fajsúlyát növeli, a mátrix kedvező tulajdonságát, a rugalmasságot vagy az átláthatóságot lerontja, a kompozitot rideggé teheti. Az előállítás szempontjából is könnyebbé teszi a kisebb térfogathányad, mivel így a diszperz fázis a hagyományos technológiákkal bekeverhető a polimerolvadékba (nagyobb mennyiségű töltőanyag a polimer olvadék viszkozitását jelentősen megnöveli).

5. A kerámiamátrixú kompozitok tulajdonságai

8.7. ábra - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ nanokompozitok szilárdsága és szívóssága a SiC-tartalom függvényében. • – hárompontos hajlítás és Vickers-keménység; □ – négypontos hajlítás; Δ – négypontos hajlítás és benyomódásos keménységvizsgálat; ◻ – hárompontos hajlítás és bemetszéses törési szívóssági vizsgálat.

Al₂O₃/SiC nanokompozitok szilárdsága és szívóssága a SiC-tartalom függvényében. · – hárompontos hajlítás és Vickers-keménység; □ – négypontos hajlítás; Δ – négypontos hajlítás és benyomódásos keménységvizsgálat; □ – hárompontos hajlítás és bemetszéses törési szívóssági vizsgálat.

6. Bevonatok

Az ipar régóta használ WC/Co szemcsés kompozitokat tömbi anyag formájában, különösen megmunkáló szerszámokban. A WC szemcsék biztosítják a nagy keménységet, a kobalt pedig a szívósságot. A két komponens arányának változtatásával a kívánt keménység/szívósság arány állítható be.

8.8. ábra - Törések a benyomódási mintázat közelében. A hagyományos bevonatoknál repedések jelentek meg a lamelláris szerkezet közelében, míg ez a nanostrukturális bevonatnál nem jelentkezett. (Hagyományos WC–12%Co és nanoszerkezetű WC–12%Co).

7. Egyéb tulajdonságok

Elektromos vezetőképesség. A polimermátrixú kompozitok gyakorlati alkalmazásakor fontos szerepe lehet a kompozit elektromos vezetőképességének, mivel sok esetben lényeges követelmény az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése. Az elektromosan szigetelő polimermátrix vezetőképességét elektromosan vezető diszperz részecskék beépítésével lehet növelni. A részecskék térfogatarányának növelésével többé-kevésbé összefüggő, elektromosan vezető, háromdimenziós hálózat hozható létre (perkoláció).

A diszperz részecskék alakja – elsősorban a hossz/átmérő arány – döntő módon meghatározza, hogy milyen térfogathányadnál alakul ki összefüggő hálózat (perkolációs küszöb).

8.9. ábra - A perkolációs küszöb függése a hossz/átmérő aránytól.

8.10. ábra - Szén nanocsővel (a), korom és réz-klorid keverékével (b), illetve csak korommal (c) töltött epoxigyanta elektromos vezető-képessége a töltőanyag térfogati hányada függvényében.

A nagy alaktényezővel (aspect ratio) rendelkező szén nanocsövek már aránylag kis térfogathányadban is háromdimenziós hálózatot képeznek és a mátrix elektromos vezetőképességét jelentősen feljavítják. Egyértelmű összefüggéseket sikerült találni a beépített szénszálak térfogataránya és az elektromos vezetőképesség között. Eszerint a hosszú, elektromosan vezető szálakból háromdimenziós hálózat alakul ki (perkoláció), amely elősegíti az áram vezetését, aránylag kis térfogathányad (< 5 tf%) esetén is. A vezetőképesség (σ) egyszerű hatványfüggvény szerint függ a szén nanocsövek térfogat arányától (ρ): $\sigma = k(\rho - \rho_t)^t$, ahol $t = 1.74$ és $\rho_t = 0.64$ (perkolációs küszöb). A vezetőképesség drasztikusan megnőhet a kompozitokban, amikor a szén nanocsövek mennyisége a polimerben eléri a perkolációs határt.

Mágneses tulajdonságok. A lágymágneses nanokompozitok kutatása több mint 15 éves múltra tekint vissza. 1988-ban a HITACHI METALS Co. kutatói arról számoltak be, hogy a korábbiaknál kedvezőbb tulajdonságú lágymágneses anyagot sikerült kifejleszteniük Nb és Cu ötvözőelemeket tartalmazó amorf Fe-Si-B szalagok részleges átkristályosításával. Az anyagot később FINEMET márkanéven hozták kereskedelmi forgalomba. A későbbi kutatások, melyekbe magyar kutatócsoportok is bekapcsolódtak, azonosították a kialakuló mikroszerkezet összetevőit és felderítették a kristályosítási folyamat mechanizmusát. A hőkezelés hatására az amorf mátrixban nanoméretű FeSi kiválások alakulnak ki. A Cu elősegíti a kristálycsírák keletkezését, a Nb pedig gátolja a göcök növekedését. A FINEMET különleges mikroszerkezete kiváló lágymágneses tulajdonságokat eredményez: az eddigi legnagyobb permeabilitást és telítési indukciót. A telítési mágneszettség értékét tovább növelték Zr alapú amorf ötvözetek részleges átkristályosításával: így fejlesztették ki a NANOPERM (Fe-Zr-Nb-Cu) és a HITPERM (Fe-Co-Zr-Cu-B) lágymágneses ötvözetcsaládokat. Előállításuk

lényegesen bonyolultabb a FINEMET-nél a Zr nagy reakcióhajlama miatt, ezért kevésbé terjedtek el a gyakorlatban. A FINEMET ötvözetek sikere ráirányította a figyelmet a koercitív erő és a szemcseméret közötti összefüggés tanulmányozására tág szemcseméret-tartományban. Herzer különböző lágymágneses anyagok szemcseméretének és koercitív erejének összehasonlításakor azt találta, hogy a koercitív erő a szemcsemérettel maximumgörbe szerint változik: a hagyományos lágymágneses polikristályos anyagoknál a koercitív erő nő a szemcseméret csökkenésével, a nanométeres tartományban viszont nagyon meredeken csökken. Az összefüggést sikerült elméletileg is értelmeznie.

Hőstabilitás. A nanokompozitok jobb hőstabilitása annak köszönhető, hogy az illékony komponensek (kismolekulájú ciklikus sziloxánok) diffúzióját például az agyaglemezkek gátolják. Nagyon vonzó az ipar számára, hogy a nanokompozitokban a kis töltőanyag-tartalom is jelentős javulást idéz elő a hőstabilitásban, mivel a termék így olcsóbb, könnyebb és gazdaságosabban dolgozható fel. Az irodalom egy része azt állítja, hogy a szilikát jelenléte miatt nő a bomlási hőmérséklet. Ezt azzal magyarázzák, hogy a bomlás közben kialakul egy szilikát határreteg, amely megakadályozza az oxigén diffúzióját a kompozit belsejébe, és nem engedi onnan kidiffundálni az illékony bomlástermékeket. Más esetekben a bomlási hőmérséklet ugyan magasabb mint a tiszta polimeré, de ez csak kis töltőanyag-koncentrációknál igaz, ahogy nő a töltőanyag mennyisége, úgy csökken a bomlási hőmérséklet, akár a polimer eredeti bomlási hőmérséklete alá is. Ez a jelenség a szilikát nehézfém-tartalmával (pl. vasionok) magyarázható.

Éghetőség. Az anyagok új osztályával, a nanokompozitokkal kiküszöbölhetik a hagyományos égésgátló rendszerek hátrányait, ugyanis megnövelhetik a sűrűséget, ami a mechanikai tulajdonságok romlásához vezethet, nagy arányban kell használni, és drágák. A nanotöltőanyagok fékezik a hővezetést, így az égéshő okozta degradáció és az égésgázok mennyisége is nagymértékben csökken. Mivel a tűz terjedéséért főképpen a hőfejlődés, annak is a maximális értéke a felelős, az éghetőség jellemzésére az ASTM E 1354 szabvány szerinti kónuszos kalorimétert alkalmazzák, amelyben 100x100x3 mm-es lapot 35 kW/m² hőáramnak tesznek ki, és mérik a hőfejlődést az idő függvényében. Kiderült, hogy például a töltőanyag és égésgátló nélküli TPU maximális hőfejlődése 44%-kal, a foszforsav-észterrel készült TPU-é 70%-kal csökken 100 rész alappolimerre számított 5 rész töltőanyag hatására. Az agyagtartalmú keverékek égésgázai valamivel hamarabb gyulladnak meg, mint az agyag. A gyulladásig eltelt idő és a maximális hőfejlődés hányadosa (FPI, fire performance index) egy empirikus mérőszám, amely a belobbanásig (azaz a menekülés lehetőségéig) várható idővel arányos. Minél nagyobb az FPI, annál több idő áll rendelkezésre a menekülésre, amelyet repülőgép utasterében szimulált tüzekkel igazoltak. Az agyagot tartalmazó TPU minták UL 94 szabvány szerint függőleges pálcán vizsgálva égés közben nem csepegték, ami ugyancsak mérsékli a tűz elterjedésének veszélyét.

8.11. ábra - Kúpos kaloriméter. A polimerek égési tulajdonságainak univerzális vizsgálatára szolgál a szabványos kúpos kaloriméter.

A mérés során az oxigénfogyasztást határozzák meg. Az elv azon alapul, hogy a levegőből elhasznált oxigén és a hőkibocsátás mennyisége között állandó kapcsolat van. A készülékkel a hőkibocsátás sebessége, a maximális hőkibocsátás, a gyulladási idő, a teljes hőkibocsátás, a tömegvesztés sebessége, az átlagos CO-hozam is mérhető.

Optikai tulajdonságok. Az abszorpciós spektrum meredek szakasza a töltőanyag mennyiségének növekedésével a nagyobb energiák felé tolódott el. Amikor kevesebb a töltőanyag, 65%-os a transzmittancia, ahogy növeljük a CdS mennyiségét, a minta kevésbé lesz átlátszó. A spektrumok alapján a tiltotsáv-energiák és részecskeméretek számolhatók. ZnO/PMMA kompozitok esetén már alacsony ZnO-tartalom mellett is hatásos UV-blokkolást tapasztalunk, miközben nagyobb rétegvastagság esetén is átlátszó marad a kompozit. Ez akár UV-szűrős kontaktlencsék készítésében lehet hasznos.

8.12. ábra - A tiszta epoxi és a különböző töltőanyagot tartalmazó kompozitok abszorbanciaspektruma.

8. Felhasznált irodalom

Csanády-Kálmán-Koncza: Bevezetés a nanoszerkezetű anyagok világába; J.H. Koo: Polymer nanocomposites; T.E.Twardowski: Introduction to nanocomposite materials; Dr. Lehotzki László: Nanokompozitok előállítása,

szerkezete, éghetősége és alkalmazása; Appl. Catal. B 125 (2012) 271; Sol. En. Mat. Sol. Cell. 82 (2004) 291; J. Sol-Gel Sci. Technol. 13 (1998) 499; Bertóti Imre: Röntgen fotoelektron spektroszkópia; ELTE Alkalmazott fizikai módszerek Laboratórium jegyzet, TEM; Dr. Mink János: Infravörös és Raman spektroszkópia alapjai; Bognár Eszter, BME, órajegyzet; Vihai Mittal, Characterization techniques for polymer nanocomposites, Wiley 2012; Dr. Tóth Zsolt – Egerházi László: A mikroszkópia alapjai (jegyzet); Pozsgai Imre A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai; Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry, Ed.:John Cuppoletti, 2011 InTech; Konczos Nanokompozitok c. jegyzete; Kovács Levente , Adalékok, a műanyagipar „varázslói”; Pál Károlyné, Polipropilén nanokompozitok; Dr. Bánhegyi György, Hol tartanak a műanyag nanokompozitok?; Dominkovics Zita, PhD-értekezés, BME, 2011; Prog. Polym. Sci. 33 (2008) 40–112; Acta mater. 48 (2000) 223-238; Acta Materialia 50 (2002) 5115–5126; Acta Materialia 52 (2004) 1061–1067; APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, May 2009, p. 2973–2976, Chemistry Central Journal 2012, 6:101; Nano Reviews 2010, 1:5214; JOURNAL OF MACROMOLECULAR SCIENCE Part B—Physics, B42, 3-4, 479–488, 2003; Int. J. Nanoelectronics and Materials 5 (2012) 57-66; Angew. Chem. Int. Ed. 2002, 41, 2034 – 2057; Nano Res. 2011, 4(4):360–369; Materials Today, november, 2004, 50; Journal of the European Ceramic Society 17 (1997) 1061-1082; Polymer 40 (1999) 5967–5971; Surface and Coatings Technology 157 (2002) 72–79; Progress in Polymer Science 35 (2010) 357–401; Biomaterials 32 (2011) 4704–4713

9. Ellenőrző kérdések

Mutassa be az EDS-t!

Mutassa be az XPS-t! Hogyan használható a nanokompozitok vizsgálatában?

Mi a kúpos kaloriméter? Mit mérünk vele? Mi a mérés alapelve?

Hogyan változnak a mechanikai tulajdonságok a nanoanyagok beépítésével? Mutassa be egy példa segítségével!

Az Al₂O₃/PP nanokompozitok esetében milyen mechanikai tulajdonságok változik, és mivel magyarázható ez a változás?

Az agyagásvány/nylon6 nanokompozitok esetében hogyan változik a Young-modulus a töltőanyag mennyiségének függvényében? Hasonlítsa össze ezt a hatást az üvegszál erősítéssel! Javítja-e a kompozit tulajdonságát, ha nagy mennyiségű töltőanyagot használunk? Miért?

Milyen bevonatokat használ az ipar a megmunkáló szerszámok esetében és miért?

Mi az a perkoláció, és hogyan lehet olyan kompozitokat előállítani, ahol ez a jelenség megfigyelhető?

Hogyan javítható a polimerek hőstabilitása? Hogyan változik az éghetőség? Mi ezek magyarázata?

Röviden foglalja össze a nanokompozitok katalitikus, antibakteriális és alakmemória-tulajdonságait!

9. fejezet - Szén nanocsövet tartalmazó nanokompozitok

1. A szénszálak és a szén nanocsövek általános jellemzése

A szénszálak felhasználása manapság igen sokrétű például textilipari nyersanyagként, az űrkutatásban, a hadiiparban, Forma-1 autók, sporteszközök, hajótestek, járművek, repülőgépek gyártása során, a mikroelektronikában, szélérőművek építésénél. A szén nanocsövek felfedezése előtt fontos állomás volt a fullerének felfedezése 1985-ben. Ezt követően 1991-ben fedezte fel Iijima a többfalú szén nanocsöveket (multi-wall nanotube, MWNT), az egyfalú nanocsövek (single-wall nanotube, SWNT) felfedezésére pedig további két évet kellett várni (1993, Iijima és Bethune). Mindenekelőtt különbséget kell tenni a szénszálak és a szén nanocsövek között. Az egyik megközelítés alapján az egydimenziós grafitként leírható anyagot szén nanocsöveknek, a kevésbé rendezett szerkezetűeket pedig szénszálaknak nevezik. A másik felfogás szerint az átmérő alapján egy adott mérethatár (30–100 nm) szerint történhet az elkülönítésük. Az első kezdetleges kompozitokat az 1930-as években állították elő, melyek polimermátrixú, úgynevezett összetett anyagok voltak. A termékek jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mert egyszerre voltak könnyűek és erősek. Ezt követően az 1950-es években először üvegszálak, majd nagy szilárdságú szénszálak alkalmazásával sikerült újabb kompozitokat szintetizálni. A szén nanocsövek különleges mechanikai tulajdonságaik miatt ígéretes jelölteké váltak a szénszálak helyettesítésére különféle kompozitokban, továbbá a kivételes struktúrának és az anizotrop szerkezetnek köszönhetően a szén nanocsövek speciális tulajdonságokat mutatnak a különböző alkalmazásokban. Az így előállított anyagokat az optika és elektronika területén használják.

9.1. ábra - Dr. Sumio Iijima, a szénszálak egyik felfedezője.

9.2. ábra - A többfalú szénszálak szerkezete.

9.3. ábra - A szénszálak felhasználása.

2. A szén nanocsövek tulajdonságai és alkalmazása

Napjaink legdinamikusabban fejlődő tudományágazatai közé tartozik a különböző szén nanoszerkezetek témaköre, ezen belül is kiemelt jelentőséggel bírnak a szén nanocsövek. A felhasználások megvalósíthatóságának alapvető előfeltétele természetesen ezen anyagok alapvető fizikai tulajdonságainak jó ismerete. A szén nanocsövek számos kiemelkedő tulajdonsággal rendelkeznek. Szakítószilárdságuk $75\times$ nagyobb az acélénál, a szénszálaknál $10\text{--}15\times$ erősebbek, ugyanakkor sűrűségük csak $1/6$ -a az acél sűrűségének. Az anyagok szívósságát szokás azzal a tömegegységre jutó energiával jellemezni, amelyet az anyag még szakadás vagy törés nélkül képes elnyelni. A szén nanocső fonalakra 570 kJ/kg értéket mértek, amely $20\times$ nagyobb, mint a lövedékálló mellényekben jelenleg használatos Kevlar®-é. Ezáltal rendkívül kedvező lehetőségek nyílnak könnyű és nagyon erős anyagok előállítására. A szén nanocsöveknek számos potenciális felhasználási lehetőségük van a molekuláris és nanoelektronikában (nanoméretű tranzisztorok, lapos téremissziós kijelzők, energiacellák stb. gyártása), a nanomechanikában (mesterséges izmok előállítása), biológiai felhasználásoknál (az ideghálózatok jelátvitelének szabályozása). Luxusalkalmazásokban már ma is előfordulnak: a Tour de France kerékpárversenyzői előszeretettel használnak olyan kerékpárt, amelynek a szénszálazás vázát szén nanocsövekkel tovább erősítették. Egy ilyen erős váz mindössze 1 kg -ot nyom. A szén nanocsövekkel erősített műanyagok egy napon a könnyű és erős kompozitok új családját jelenthetik, amelyek különösen a gépkocsi-vagy repülőgépgyártásban válhatnak nélkülözhetlenné.

9.4. ábra - A szén nanocsövek elektrotechnikai alkalmazása: téremissziós kijelző.

3. A kompozitok és előállításuk

A szén nanocsövek különleges fizikai és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, így felhasználhatók kompozitok előállítására. Az előállításnál problémát jelent a nanocsövek felületének nedvesíthetősége és bekeverhetősége a fém- vagy polimermátrixba. Egy felületi szervesetlen réteg kialakításával kedvezően befolyásolhatjuk a polimerekkel kialakított kapcsolat tulajdonságait, valamint egy jól megválasztott és kialakított szervesetlen bevonattal és a megfelelő hőkezeléssel sok problémát kiküszöbölhetünk a mátrixba történő bekeverés során. A leggyakrabban alkalmazott szervesetlen rétegek a titán-dioxid, az alumínium-oxid és a szilícium-dioxid. A szervesetlen rétegek előállításának lényege, hogy az egyfalú vagy többfalú szén nanocsövek felületét homogén szervesetlen réteggel, általában valamilyen átmenetifém-oxiddal borítjuk be. A leggyakoribb eljárások a heterokoagulációs technika, az impregnációs technika, a hidrotermális hidrolízis, többfalú szén nanocső esetén az elektrolitikus bevonás és a CVD-szintézis. A kompozitszintézis kezdetén a nanocső felszínének tisztának kell lennie, mert a felületen lévő amorf szén gátolhatja, vagy megakadályozhatja a szén nanocső felszíne és a borítóanyag közötti kapcsolódás kialakulását. Az amorf szén eltávolítása savas kezeléssel és mosással történik.

Példa: többfalú szén nanocső szintézise CCVD (Catalytic Chemical Vapour Depositon) módszerrel, csökekemencében Fe, Co/CaCO₃ hordozós katalizátoron, acetilénbontással, nitrogénatmoszférában. Oldószermentes és oldószeres környezetben, TiCl₄, TiBr₄, Ti(OiPr)₄, Ti(OEt)₄, AIP, ZnCl₂, ZnSO₄, Zn(CH₃COO)₂, SnCl₂ és TEOS prekursorokkal. Az alkalmazott oldószereknek fontos, hogy eltérő dipólusmomentummal rendelkezzenek (EtOH, aceton, DMF, toluol, kloroform). Közvetlen összemérés nitrogénáramban, impregnálás.

9.5. ábra - Nanokompozitok előállítása csökekemencében.

9.6. ábra - A csökekemence közelebbről.

A szervesetlen réteg kialakulásának feltétele, hogy a szén nanocsövek felületén hibahelyek legyenek, melyek a szintézis során keletkeznek. Néhány esetben szükség lehet a felület módosítására, mely kémiai és fizikai eljárásokkal lehetséges. Ez nemcsak a szervesetlen réteg kialakítása szempontjából fontos, hanem a szén nanocsövek polimermátrixba való homogén bekeverését is elősegíti. Kémiai felületmódosítás során különböző funkciós csoportokkal rendelkező vegyületeket használunk, amelyek a nanocső falát alkotó szénatommal erős kémiai kötést tudnak kialakítani. Különböző savas kezelésekkkel például karboxilcsoportok vihetők a felületre, amelyek további módosító eljárások során könnyen reakcióba vihetők. Fizikai felületmódosítás során az alkalmazott anyagok gyengébb kölcsönhatásba lépnek a nanocsővel, annak felületén megtapadva megakadályozzák az agglomerátumok képződését. Fizikai felületmódosítás során az adszorbeálódott módosító molekulákat van der Waals-erők vagy π - π kötések tartják a nanocső felületén, ezért nem bomlik meg a szabályos felületi struktúra. Tehát a nanocső a módosító anyaggal gyengébb kölcsönhatásba kerül, mint a kémiai felületmódosításnál, ezért ennek során a nanocső felülete nem sérül, szerkezete változatlan, stabil marad.

Az előállítás során minden esetben szükségünk van kvalitatív és kvantitatív információkra is, ehhez többfajta vizsgálati módszert kell alkalmazni: mikroszkópos technikákat (TEM, HRTEM, SEM), elemanalízist (SEM-EDX, XRD, ED), szerkezetvizsgálatot (IR), a hőkezelés hatását (TG), az adszorpció tulajdonságokat (BET). A továbbiakban az elektronmikroszkópok felépítését tárgyaljuk részletesen.

4. A transzmissziós és a pásztázó elektronmikroszkóp felépítése

Az elektronmikroszkóp elektronforrása a fénymikroszkóp fényforrásához hasonlítható, a leképezést az objektív végzi, azonban míg a fénymikroszkópokban a végső nagyításról az okulár gondoskodik, az elektronmikroszkópokban projektorrendszer van, mely a „képet” fluoreszkáló ernyőre, illetve a modern eszközöknél elektronikus detektormátrixra vetíti. A transzmissziós elektron-mikroszkóp oszlopterében nagyvákuum ($<10^{-2}$ Pa) uralkodik, hogy a felgyorsított elektronok minél kevesebb gázmolekulával

ütközzenek. A legáltalánosabban alkalmazott elektronforrás az árammal izzított volfrámkatód. Az izzókatódból kibocsátott elektronok koncentrálására és irányítására a katód és az anód közé iktatott negatív előfeszültségre kapcsolt Wehnelt-henger szolgál. A volfrámszálok viszonylag rövid élettartamúak, lantán-hexaboritból hosszabb élettartamú, igen fényerős katód készíthető. A szokásosnál jóval nagyobb fényerőt biztosító téremissziós katód emittáló része finom csúcsban végződő volfrám egykristály. Az elektronnyaláb koncentrálását a kondenzorlencsék végzik. A nagyteljesítményű készülékek kettős kondenzorrendszere erős első, és gyengébb második lencséből áll. Az első lencse az elektronsugár-nyalábot kis átmérőjű foltta fókuszálja, melyet a második lencse a minta síkjába vetít. A kondenzorrendszer jellegzetes hibája az asztigmatizmus, mely abban nyilvánul meg, hogy a sugárnyalábnak a tárgysíkba vetítődő, egyébként kerek foltja ellipszis alakúvá torzul. Ez a hiba a kondenzor síkjában elhelyezett asztigmatizmus-korrektorral kompenzálható. Az elektronmikroszkóp teljesítőképességét elsősorban az objektívlencse optikai tulajdonságai határozzák meg. Cél a minél kisebb fókusz-távolságú objektív alkalmazása, mely adott gyorsítófeszültség esetén a lencse mágneses mezejének erősségével szabályozható. A jó feloldás és a vizsgálandó minta mozgathatóságának egyidejű megvalósítása csupán kompromisszummal érhető el, ugyanis minél erősebb az objektívlencse, annál kisebb hely jut a koordinált mintamozgató szerkezet befogadására. Ugyan az objektívlencse teljesítőképességét elsősorban a konstrukciója határozza meg, sok múlik az asztigmatizmus korrigálásán és a megfelelő apertúra megválasztásán is. Az objektívapertúrák, melyek 20–80 μm átmérőjű furattal ellátott, általában platinából, molibdénből vagy tantáliból készült korongok vagy lemezek, a lencse tengelyvonalában, a hátsó gyújtósíkban, a pólussaruk rései között helyezkednek el. Az elektronmikroszkópos vizsgálatoknál igen nagy szerepet kap a minta előkészítése. Mivel az elektronok behatolóképesége csekély, a mintákból ultravékony (60–70 nm-es) metszeteket készítenek, melyeket vékony fémrácsokra, ún. mikrorostélyra vesznek fel. Ha a mintából szuszpenzió készíthető, azt olyan rácsokra veszik fel, amelyet előzőleg vékony hártával vontak be. A rácsokra helyezett mintákat zsiliprendszeren keresztül, általában fém tartóvilla segítségével helyezik az objektív pólussarujának erre a célra kialakított részébe. A mintatartó rendszer feladata az elektronsugár hatására keletkező nemkívánatos hő elvezetése és a minta mozgatása is. A modern eszközökben a mintatartók dönthetők és forgathatók is. Közvetlenül az objektívlencse alatt található a térhatároló apertúra, melyet elektrondiffrakciós vizsgálatoknál a látómező megfelelő részeinek elhatárolásakor használnak. Egyes készülékekben a térhatároló apertúra és a közbenső lencsék között diffrakciós lencse is található. A lencsék helyzetét az oszlopon keresztülvezető csavarokkal vagy elektronikus vezérléssel lehet állítani. A projektorrendszer az objektívlencse által létrehozott képet nagyítja tovább. A végső nagyítást az objektívlencse, a közbenső lencse és a projektorlencse nagyításainak szorzata adja. A projektorrendszer alatt helyezkedik el a megfigyelőkamra, melyben a régi berendezéseknél fluoreszkáló ernyő és fotoanyag befogadására alkalmas kamera a modern eszközökben elektronikus detektorrendszer található.

Bár sok a hasonlóság a fény- és elektronmikroszkópok között, képalkotásuk jelentősen különbözik. Az elektronmikroszkópban két fő folyamat játszódik le, az elektronok rugalmas és rugalmatlan szóródása. Ha az elektronnyaláb elektronjai eltalálnak egy atommagot vagy annak közelébe jutnak, viszonylag nagy szögben, gyakorlatilag energiavesztés nélkül térülnek el, mert a mag tömege sokkal nagyobb az elektron tömegénél. Így jön létre a rugalmas szóródás. Az eltérített elektronok száma a metszet vastagságával és anyagsűrűségével arányosan nő, minél nagyobb az alkotóelemek atomszáma, annál nagyobb a szóródás. Ha fizikai akadályt, például viszonylag kis nyílású apertúrát helyezünk a minta mögé, a szóródott elektronok kirekesztődnek a sugárnyalábból, és a kép intenzitása csökken azokon a területeken, ahol a minta alkotórészeinek atomszáma és vastagsága nagyobb. Ez esetben a megjelenő kép azon elektronok hiányából adódik, amelyeket az apertúra kirekesztett. Az intenzitás ily módon történő változása hozza létre az amplitúdókontrasztot. Az elektronszóródás szöge az elektronok energiájától is függ, melyet a gyorsítófeszültség határoz meg. Az elektronok energiájának növelésekor csökken az elektronszóródás szöge, így csökken a kép kontrasztja, a gyorsítófeszültség csökkenése ezzel szemben a kép kontrasztjának növekedését okozza. Ha az elektronsugár egy elektronja a vékony minta egy atomjának héjában lévő elektronjával ütközik, a kölcsönhatás következtében a mintába csapódó elektron az energiájának nagy részét átadja a héjbeli elektronnak. Ezt a folyamatot nevezik rugalmatlan szóródásnak. Ha a vizsgált minta vékony, az egyes becsapódó elektronok ritkán vesznek részt egynél több ütközésben, így gyakorlatilag az összes rugalmatlanul szóródott elektron átjut az objektívapertúrán. A kis energiavesztés az elektronhoz rendelhető hullámhossz megváltozásával jár, azaz a mintába bejutó és az azon keresztülhaladt elektronsugár között fáziseltolódás tapasztalható. A tárgy mögött, a képsík egyes pontjaiban a szóródott és nem szóródott elektronok vektoriálisan összeadódva egy eredő hullámot képeznek, így jön létre a fáziskontraszt. Az elektronmikroszkópos kép kontrasztja az amplitúdókontraszt és a fáziskontraszt összeadásaként keletkezik. A minta nagyobb atomtömegű részeinél az előbbi, kisebb atomtömegű összetevőinél az utóbbi dominál.

9.7. ábra - A transzmissziós elektronmikroszkóp felépítése.

9.8. ábra - A transzmissziós elektronmikroszkóp mintamozgatója.

A transzmissziós elektronmikroszkópokkal szemben a pásztázó elektronmikroszkópoknál lokális kölcsönhatásról és képalkotásról beszélhetünk. Az egy pontból gyűjtött információ csökkenti a lencsehibák hatását, nagyobb leképezési áramsűrűségek és mintavételi idők alkalmazását teszi lehetővé, javítja a kontrasztot, valamint utat nyit a digitális képfeldolgozásnak. Pásztázó üzemmódban a pásztázást két mágneses tekercspár segítségével valósítják meg. A „vízszintes” és „függőleges” eltérítést szolgáló tekercseken egyaránt fűrészfűzés végzi a vezérlést. A képenkénti pásztázó vonalak számát az x és y irányú pásztázási sebességek hányadosa adja meg, lassú pásztázással javítható a jel/zaj viszony, ezáltal a kép minősége. Ugyan pásztázó elektronmikroszkópok alatt általában hallgatólágyan „reflexiós” üzemmódú mikroszkópokat értünk, léteznek koncentrált pásztázó elektronnyalábja keresztülhalad azon, miközben az egyes mintapontok anyagának és szerkezetének megfelelő változást szenved, melyet a minta alatt elhelyezkedő detektor érzékel, és katódsugárcsőves vagy LCD-kijelzőn pontról pontra megjelenít. A pásztázó transzmissziós elektronmikroszkópnál a minta mögött nem használnak elektronlencsét, így nem lép fel elektronvesztés a színi hiba miatt. A (reflexiós) pásztázó elektronmikroszkópok felépítése – az eltérő forrásból származó anyagi információ miatt – jó közelítéssel csak a detektálás módjában különbözik a (pásztázó) transzmissziós elektronmikroszkópokétól. A kép létrehozásához itt is fókuszált elektronsugarat alkalmaznak, mely kölcsönhat a minta atomjaival. Ennek során az elektronok az atomok elektromos terén szóródhatnak, és másodlagos elektronokat üthetnek ki különböző elektronhéjakról. Az így megüresedett alacsonyabb energiaszintű belső héjra egy külső héjról elektron lép át, és a héjak közti energiakülönbség karakterisztikus röntgensugárzás formájában távozik, vagy az energiakülönbséget elektronok vihetik el (Auger-elektronok). Emellett az elektron–anyag kölcsönhatás során keletkezik a röntgentartományba eső folytonos spektrumú fékezési sugárzás, látható fény (katódlumineszcencia) és hő is. A készülékek az elektronnyaláb–minta kölcsönhatás során a mintából kilépő elektronokat és sugárzást detektálják. A pásztázó elektronmikroszkóp két fő részből áll. A toronyban jön létre az elektronsugár, mely kis pásztázó ponttá fókuszálódik a minta felületén, és itt gyűjtik be a szekunder és visszaszórt elektronokat is. A másik fő rész az elektronikai vezérlőegység és a villamos tápegység. Az elektronágyú stabilizált nagyfeszültségét, a katód előfeszültségét, a lencsetekercsek és sugáreltérítő tekercsek stabilizált áramát, valamint a különböző szelepek, szivattyúk, ellenőrző rendszerek áramellátását is a villamos tápegység végzi. A mikroszkóp elektronikai egységét vezérlő számítógépes programmal lehet beállítani az elektronnyaláb paramétereit, a fókuszálást, a nagyítást és a kép intenzitását, kontrasztját.

9.9. ábra - A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése.

9.10. ábra - A pásztázó elektronmikroszkóp felépítése.

A vákuumrendszerben az elővákuum (10^{-1} Pa) eléréséhez az elektronmikroszkóppal rugalmas csőrendszerrel összekapcsolt rotációs szivattyúkat alkalmaznak. Annak érdekében, hogy az elektronágyúból kilépő elektronnyaláb haladás közben minél kevesebb gázmolekulával ütközzék, kívánatos, hogy a legnagyobb nyomású mintatérben is 10^{-3} Pa-nál kisebb legyen a nyomás. Ezt a vákuumot turbomolekuláris szivattyú biztosítja. Az elektronágyúban ultranagy vákuum szükséges. A katódtérben a gáznyomás $\sim 10^{-8}$ Pa. A minta és a katódtér között szükséges nyomáscsökkentés többfokozatú turbomolekuláris és iongetter-szivattyúból álló rendszerrel valósítható meg.

A pásztázó elektronmikroszkópok leggyakrabban alkalmazott elektronforrása az elektronágyúban lévő téremissziós katód. Ennek legfontosabb eleme egy hegyes volfrámcsúcs, melyre nagyfeszültséget kapcsolva az elektronok a csúcs közelében fellépő nagy elektromos térerősség hatására hidegemisszióval lépnek ki. Ezeket az elektronokat egy második anódra kapcsolt gyorsítófeszültséggel gyorsítjuk. Az elektronok sebességét az alkalmazott gyorsítófeszültség határozza meg. Az elektronok az anódlemez közepén található apertúrán haladnak keresztül, és ezután sebességük, illetve mozgási energiájuk nem változik.

A gyorsított elektronok fókuszálására mágneses lencsét használnak. A mágneses elektronlencse bonyolult geometriájú elektromágnes, melyben a térerősséget a tekercsben folyó áram nagysága határozza meg. A mágneses elektronlencsék fókuszálóképességét a pólussaruk közötti térerősség, és a keresztülhaladó elektronok sebessége befolyásolja. Az elektronforrásból kilépő elektronokat a kondenzor és az objektívlencse

összpontosítja a mintára. Az elektronágyúhoz közelebb lévő lencsét kondenzorlencsének nevezik, míg a mintához közeli lencse az objektívlencse. A kondenzorlencse az elektronnyalábot erősen redukált átmérőjű foltta fókuszálja, míg a változtatható fókuszú objektívlencse feladata az, hogy az elektronnyalábot különböző magasságokba fókuszálja, és így a fókusz a minta felszínére lehessen beállítani. Mivel az objektívlencsén nagy áramok folynak keresztül, vízáramoltatással kell hűteni. A kondenzorlencsét és az objektívlencsét változtatható apertúrával készítik. Az apertúrákra egyrészt azért van szükség, hogy a vizsgálandó mintákat a túlzott hőhatástól védjék, másrészt hogy csökkentsék a röntgensugárzás keletkezését. Az apertúra átmérőjétől függ, hogy az több vagy kevesebb elektront rekeszt ki, következésképpen a kép kontrasztját is befolyásolja: nagyobb apertúra alkalmazásakor nő a kép kontrasztja, azonban a feloldás rovására, így a megfelelő apertúra megválasztása kompromisszumot jelent.

A mintakamra tágas evakuált térrész az objektívlencse alatt, amely a mintaasztalt és annak a mozgatásához szükséges eszközöket tartalmazza. A mintaasztal a tér bármelyik irányába mozgatható, forgatható és dönthető. A mintakamrában helyezkednek el az elektrondetektorok, a röntgen- és katódlumineszcencia-detektor, és ide csatlakozik a turbomolekuláris szivattyú szívótorka is. A vezető mintákat a mintatartóval elektromos kontaktusba kell hozni. A mintát ezért a legtöbbször ezüstöt tartalmazó ragasztóval (ezüstpasztával) ragasztják a mintatartóra, mely az elektromos kontaktust is biztosítja. A szigetelő tulajdonsággal rendelkező minták (pl. biológiai anyagok) felületét elektromosságot vezető vékony réteggel (pl. arannyal) kell bevonni. Ennek hiányában ugyanis elektromos feltöltődési jelenségek lépnének fel, mely befolyásolja az elektronsugár útját, így a képalkotást zavarja. A nagy mélységélességű üzemmód főleg biológiai objektumok, kisebb élőlények vizsgálatára használatos. Erre az üzemmódra értelemszerűen a nagyobb munkatávolság és a kisebb numerikus apertúra jellemző, ennek megfelelően a felbontást az 1 pixelhez tartozó nyalábátmérő határozza meg. Mivel több nm-es vertikális fókuszolt-elmozdulás esetén is a pixelméret alatt tartható a nyalábkeresztmetszet mérete, elektronmikroszkóp segítségével nagyobb mélységélesség érhető el, mint optikai mikroszkóppal.

Általános vizsgálatoknál néhány 100× és néhány 10 000× közötti nagyításokat alkalmazunk, melyeket a normál üzemmód képes biztosítani. Normál üzemmódban a legtöbb elektronmikroszkópos vizsgálati módszer (SE, BE, CL, SC) egyidejűleg használható. A következőkben a detektálási módszereket tárgyaljuk részletesebben.

5. Felhasznált irodalom

Radnóczy György: A transzmissziós elektronmikroszkópia és elektrondiffrakció alapjai; Pozsgai Imre A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai; Dr. Tóth Zsolt – Égerházi László: A mikroszkópia alapjai (jegyzet)

6. Ellenőrző kérdések

Mely tulajdonságok teszik alkalmassá a szén alapú erősítő anyagokat a nanokompozitokban történő alkalmazásra?

Hogyan osztályozhatók a mesterséges szálas anyagok?

Milyen tulajdonságok alapján különíthetők el a szénszálak és a szén nanocsövek?

Mikor kezdődött a szénszálak karrierje?

Mi jellemzi a könnyű és erős kompozitok új családját?

Milyen szervesetlen rétegek vihetők fel a szén nanocsövek felületére és hogyan?

Milyen technikák alkalmasak a szén nanocső alapú kompozitok jellemzésére?

Milyen problémákra jelenthet megoldást a szervesetlen–szén nanocső kompozitok készítése?

Hogyan működik a pásztázó elektronmikroszkóp?

Hogyan működik a transzmissziós elektronmikroszkóp?

10. fejezet - A nanokompozitok alkalmazásai 1

1. Az előállított kompozitok felhasználása, jelenlegi feladatok és projektek

A Szegedi Tudományegyetemen jelenleg számos szervesetlen réteg kialakítása és vizsgálata folyik. Fotokatalitikus vizsgálatok zajlanak a különböző összetételű és felületi struktúrájú TiO_2 /MWNT kompozitok esetében. Szenzorok alapanyagának előállítását és vizsgálatát végzik, az előállított kompozitok polimermátrixba történő keverését vizsgálják. Fontos szerepet tölt be a spirális szén nanocsövek előállítása és vizsgálata, valamint az új katalizátorok és katalizátorhordozók tesztelése.

2. Felhasználási és alkalmazástechnológiai területek

Ultra- és szupervékony, legkevesebb egy-két atomnyi vagy molekulányi vastagságú, rétegekből álló, több rétegben felépített nanokompozitok, polimer nanokompozit műanyagok és szuperanyagok.

Nyomathordozó-, csomagoló- és címke-alapanyagaként: dekoratív, védő, nemesítő, öntisztuló réteggépző anyagok, filmek és fóliák.

Az anorganikus összetételük folytán, a könnyű súlyuk ellenére fokozott fizikai, sugár-, szélsőséges hőmérséklet-, tűz- és kémiai ellenálló képességgel, mechanikai, dörzs-, karc-, korrózió-, szervesoldószer- olaj- és vízállósággal, UV-sugárzás és oxidáció ellen védelmet nyújtó, élettartam-növelő és romlásgátló tulajdonsággal rendelkezhetnek.

Színezék és pigment nélküli színes nanofestékek, optikai kommunikációs célokra is alkalmazható nanolakkok és nemesítő nanorétegek, elektronikus festékek (e-ink) és felülírható, többször is használható elektronikus papír (e-paper) alapanyagai, fluoreszcens és színváltó tulajdonságokkal is.

Funkcionális bevonatok és mázak, hordozható energiaforrásban és nanodisplay rendszerekben is felhasználható vezetőképes ragasztók és polimerek, továbbá nanoméretű töltőanyagok papír- és műanyagipari célokra.

Biztonságtechnikai célú címkék anyagai, indikátorrétegei, termékazonosság-, minőség- és márkavédelmi céllal; hamisítást, rongálást, illetéktelen beavatkozást jelző címkék; termékromlást, fizikai-kémiai körülmények megváltozását jelző funkcionális címkék, illetve intelligens csomagolóanyagok gyártási alapanyagaként.

Védett dokumentumok, személyi igazolványok, értékpapírok stb. láthatatlan – csak speciális szkennelvel olvasható – nanokódjai (nano barcodes), a mikroszínkódok és digitális ujjlenyomatok készítésére szolgáló nanoanyagok és nanoeszközök.

3. Szervesetlen pigment-nanokompozitok fejlesztése festékipari alkalmazások céljára

A speciális, több előnyös tulajdonsággal (például fényvisszaverő képességű, időjárás-állóság, dekorativitás, versenyképes ár) egyidejűleg rendelkező festékipari alapanyagokként csak különleges, többkomponensű kompozitanyagok használhatók. Az úgynevezett „mag-héj” szerkezetű kompozitok egy hordozóanyag mellett annak felületére leválasztott, folytonos héjanyagot is tartalmaznak. A kompozit héjrészének vastagsága gyakran a nanométeres tartományba esik, de a hordozó felületének módosításához, illetve a kívánt felületi tulajdonság és ezen keresztül a megfelelő fizikai/kémiai hatékonyság eléréséhez ez is elegendő. A kis méretű titán-dioxid (TiO_2) részecskéket, kiváló optikai tulajdonságaik miatt, fehér pigmentként nagy mennyiségben használja a festék-, a műanyag-, a kozmetikai- és a papíripár. Számos felhasználási területen azonban nem titán-dioxid port, hanem egy makroszkópos szilárd felületre felvitt vékony titán-dioxid réteget alkalmaznak például védőrétegek, antireflexiós filmek, elektro- és fotoaktív filmek, szenzorok stb. előállításánál. A titán-dioxid manapság a leggyakrabban használt fotokatalizátor, különösen nagy érdeklődés kíséri a szennyvíztisztítás területén való alkalmazási lehetőségét. Előállítható például az úgynevezett nedves kémiai eljárások közé tartozó szol-gél

technikával is. A módszernek számos előnye van: egyszerű, olcsó berendezést igényel, nem kell sem vákuumot, sem magas hőmérsékletet biztosítani; a keletkezett film homogén, vastagsága könnyen szabályozható; a film a legkülönbözőbb anyagú, alakú és méretű szubsztátumra felvihető.

4. Nanokompozit bevonatok

A rohamos technikai fejlődésnek köszönhetően fellendült a szerkezeti anyagok tribológiai tulajdonságainak kutatása és a különleges felületi rétegek kialakítása. A gyorsan mozgó felületek és a nagysebességű megmunkálások olyan rétegek kidolgozását kívánták meg, amelyek a kopásállóságot, kis súrlódást még extrém feltételek (magas hőmérséklet, korrozív atmoszféra) mellett is biztosítják. A kopásállóság kvantitatív módon nehezen jellemezhető tulajdonság, hiszen legalább két anyag kölcsönhatásáról van szó, és mértéke a kölcsönhatás környezetétől (száraz vagy nedves környezet), továbbá a mozgás jellegétől (csúszó vagy egyéb súrlódás) is függ. A kopásállóság nem azonos a keménységgel, hiszen kialakításában egyéb – gyakran egymásnak ellentmondó – igényeket, főleg a szívósságot továbbá a termikus és kémiai stabilitást is figyelembe kell venni (a keménység döntő szerepét persze nem lehet kétségbe vonni). A nanokristályos tömbi anyagoknál tapasztalt keménységnövekedés alapján intenzív kutatásokat kezdtek folytatni a tribológiai tulajdonságok gyakorlati értékesítése érdekében. Rájöttek, hogy egyedül a szemcseméret csökkentése nem elegendő különlegesen kemény rétegek kialakítására, ugyanakkor egyes többkomponensű, speciális mikroszerkezetű felületi rétegekkel kiváló eredményeket lehet elérni. Problémák adódnak a nehéz minősíthetőségből kifolyólag is.

Az ipar régóta használ WC/Co szemcsés kompozitokat tömbi anyag formájában, különösen megmunkáló szerszámokban. A WC szemcsék biztosítják a nagy keménységet, a kobalt pedig a szívósságot, a két komponens arányának változtatásával a kívánt keménység/szívósság arány beállítható. A hagyományos keményfémekben a WC szemcsemérete jellegzetesen néhány mikrométer körüli érték. A vizsgálatok rámutattak, hogy a szemcseméret csökkentésével a keménység jelentősen növelhető. a keményfém réteg kialakításának első lépéseként nanoszemcsés WC/Co port állítanak elő, gyakran mechanikai ötvözéssel. Ezt követően a megfelelően előkészített (részben agglomerált) port általában termikus szórással, nagysebességű oxigéntartalmú lánggal vizsik fel a szubsztát felületére (ipari megvalósítás közelében).

Kedvező keménységet lehetett elérni periodikusan változó felületi rétegszerkezetekkel, ahol az egyes rétegek vastagsága 5–10 nm közötti. Különösen kedvező eredmények születtek fém-nitrid/fém, illetve különböző fém-nitridek rétegszerkezeteiben, például TiN/Nb, TiN/VN, ZrN/CNx kombinációkban. A keménység értéke ezeknél az anyagoknál meghaladta a szuperkemény rétegekre jellemző 40 GPa feletti értékeket, a rétegek tulajdonságai viszont erősen függtek az egyes rétegek vastagságától, és stabilitásuk sem bizonyult kielégítőnek. Jelenleg azok a szuperkemény felületi rétegek tűnnek a legkedvezőbbnek, melyekben nanoméretű részecskék vannak amorf mátrixba beágyazva. ilyen rétegek CVD módszerrel alakíthatók ki. Kiemelkedő tulajdonságúak a nanokristályos TiN/amorf BN és a nanokristályos TiN/ amorf TiBx/amorf BN bevonatok. A nanokristályos szemcsék átmérője 10–40 nm között van, keménységük eléri a 45–50 GPa-t, és termikus stabilitásukat megőrzik 900 °C-ig. A nagyon kemény felületi bevonatok keménységének meghatározása a felületi alagútmikroszkópoknál használt elvet hasznosító, úgynevezett nanoindentációs módszereket fejlesztettek ki (nem szabványos). Az egyes szerzők által használt hőmérséklet-mérési módszerek egymástól nagymértékben különböznek, ami megnehezíti az eredmények összehasonlítását.

5. Nanoelektronika és nanooptika

A nanorészecskék termotrop folyadékkristályos rendszerekbe ágyazhatók. A nanorészecskék, elsősorban azok anizotrop formái (az eddigi közölt eredmények rúd alakú részecskékre vonatkoznak) a termotrop rendszer mint mátrix sajátságainak változtatásával térben makroszkopikus módon irányíthatók. A rendszerre kapcsolt elektromos tér hatására a részecskék optikai tulajdonságai szabályozhatók és beállíthatók. Így új típusú kijelzők, átviteli eszközök konstruálhatók. Az eszközök fejlesztése párhuzamosan halad a mátrixként használt termotrop folyadékkristályos anyagok és az abba beleágyazott nanorészecskék új típusainak előállításával, valamint a kétféle anyagból, a nanorészecskéből és folyadékkristályos anyagokból álló nanokompozitok tulajdonságainak megismerésével.

6. Szenzorok

A kémiai szenzorok (köztük a gázérzékelők és bioszenzorok) – melyek egyre nagyobb szerepet játszanak ma már nemcsak a műszaki gyakorlatban – mind vékonyrétegekből épülnek fel. Az érzékelőként használt (általában

félvezető tulajdonságú) anyagok elektromos paramétereit (ellenállását/impedanciáját) a szilárdtest felületével kölcsönható, szorbeálódó detektálandó közeg töltésátmenet révén változtatja meg. Az elektromos vezetési jelenségek változása érinti a tömböt, és polikristályos szilárd test esetében a szemcsehatárt is. Az, hogy melyik változás a domináns, a szenzoranyag és a detektálandó komponens függvénye. Több komponens egyidejű jelenléte esetén szerephez jut a kompetitív szorpció jelensége is, befolyásolva a szenzoranyag szelektivitását. Ugyancsak szerephez juthat a szilárdtestfelület katalitikus aktivitása, a komponensek közti esetleges kémiai folyamatok elősegítése útján. A kémiai szenzorok fő felhasználói jelenleg a járműtechnika és a környezetvédelem (az égési folyamatok optimalizálása, a károsanyag-kibocsátás csökkentése). A közeljövőben a biológiai szenzorok lényeges térhódítása is várható.

A szenzor olyan eszköz mely valamilyen stimulust érzékel és arra elektromos jel generálásával válaszol. A kémiai szenzorok olyan kisméretű eszközök, melyek képesek bizonyos kémiai komponensek minőségét, vagy mennyiségét szelektíven érzékelni, és ezt az információt valós időben elektromos jellé konvertálni. A fizikai szenzorok különféle fizikai mennyiségek (pl.: hőmérséklet, nyomás, áramlási sebesség, fényintenzitás stb.) érzékelésére képesek. Sokféle mennyiség mérhető ellenállásmérésre visszavezetve, leggyakoribb a hőmérséklet-mérés, mely kiemelt fontosságú a szenzorikában. Nagyon sok szenzor hőt fejleszt működése közben, ez a hő áterjed a környezetre, mérési hibát okozva ezzel. Emiatt szinte minden szenzor elrendezésnél egy belső hőmérséklet-mérő szenzor, melynek segítségével ezen effektusok a mérő-szabályzó rendszerrel korrigálhatók.

Hőmérséklet-mérő szenzorra példa lehet a MWCNT/poli(sztírol-b-(etilén-ko-butilén)-b-sztírol) (SEBS) triblokk-kopolimer kompozit. A többfalú szén nanocsövek érdekes mechanikai, termikus és elektromos tulajdonságokkal, valamint alacsony perkolációs határral rendelkeznek, emellett ellenállásuk erős hőmérséklet-függést mutat. A polimerek a nanokompozitok gyakori mátrixai, szén nanocsövek diszpergálása során felületaktív anyag, jelen polimerben egyaránt vannak kemény (polisztírol) és lágy (polibutadién) szegmensek is, ezáltal erős a nanocső–sztírol interakció.

10.1. ábra - MWNT/SEBS szenzor.

A cél egy hőmérsékletre érzékeny, többfalú szén nanocsövet tartalmazó nanokompozit készítése, mely által miniaturizált szenzorelrendezés nyerhető, leginkább különféle felületekre felvihető vékony film formájában (Sensors and Actuators A 178 (2012) 94-99). A MWCNT/SEBS kompozitot 50 µm vastag poliimid filmre vitték fel. A poliimid kémiaiilag relatíve inert anyag, és alacsony a permeabilitása a vízzel és gőzökkel szemben. A poliimid rétegre mikrofabrikációs módszerekkel (fotolitográfia) rézcsatornákat vittek fel, melyeket nikkellel és rézzel vontak be. (Egyszerre két szenzor készíthető). Erre „drop cast” módszerrel cseppentik fel magát a kompozitot, végül egy záró poliimid réteg következik az érzékelőfilm védelme érdekében. A kalibrációhoz két fűthető alumíniumlapka közé helyezték a szenzort, majd az ellenállást a kivezetéseknél multiméterrel mérték. Az egyes nanokompozit-összetételek, s így szenzor reprodukálhatósága kritikus. A válaszidő átlagosan 5 másodperc.

A nyomásmérő szenzorokra példa a flexibilis nanokompozit szenzor orvosi alkalmazásokhoz. A cél egy olyan szenzorkonstrukció készítése, mely extrém flexibilitással rendelkezik és kisméretű. Az elkészített szenzor használható az endovaszkuláris aneurizmát javító műtétek során. A feladat megoldására rendezett CNT-PDMS nanokompozitot alkalmaztak. A PDMS előnyei, hogy átlátszó, biodegradábilis, flexibilis és nem mérgező, a szén nanocsövekre pedig a piezorezisztivitás és a kapacitív sajátságok jellemzők, így nyomásmérésre alkalmas. Minden nyomásmérő szenzor transzducer, és például piezoelektromos vagy piezorezisztív tulajdonságokat használ. Az eddig alkalmazott biokompatibilis szenzorok szilikaalapúak voltak, melyeket a ridegség és a kis flexibilitás jellemzett, magasabb hőmérsékleten limitált volt a működésük és külső áramforrást igényeltek. Az új szenzor 3 rétegből áll, a két alsó között referencianyomású levegő található. A nagyfokú rendezettséget mutató szénnanocső-erdő között PDMS található (kevesebb mint 1 V/V% CNT-tartalommal), és ha a külső nyomás változik, deformálja a rétegeket, ami kapacitásváltozásokat eredményez. (Procedia Engineering 25 (2011) 140 – 143)

10.2. ábra - CNT-PDMS szenzor.

10.3. ábra - CNT-PDMS szenzor mechanikai ellenállóképessége.

A nedvességtartalom- és gázérzékelésre példa a polipirrol/ Fe_2O_3 nanokompozit alapú szenzor. Mind a vas-oxid, mind pedig a polipirrol érzékeny a páratartalomra, illetve különféle gázok jelenlétére. A polipirrol stabil polimer, számos helyen használják, kitüntetett az érzékenysége a nitrogén-dioxid, illetve az ammónia jelenlétére. A vas-oxid gáz- és nedvességérzékelő képessége elmarad a vezető polimerektől és nagyban függ a kristályszerkezettől (porozitás), ugyanakkor adalékolással növelhető (Ti, Sn, Zn stb.). A kompozitot granulátum formájában szintetizálták, melyet aztán a további vizsgálatok céljából pasztilláztak, és levegőn nagyfokú stabilitást mutatott. (Sensors and Actuators B: 81 (2002) 277–282.)

10.4. ábra - Gázérzékelési érzékenységi görbék (a: metán, b: nitrogén) a koncentráció függvényében.

A kémiai szenzorokra példa a fenolos komponensek érzékelésére alkalmas PANI (polianilin)/lakkáz vékonyrétegszenzor. A lakkáz nevű enzim oxigénredukció mellett katalizálja a fenolos komponensek oxidációját. A PANI vezető polimer, mint mátrix kettős szerepet tölt be. Az enzim által katalizált reakció folyamatát így egyszerűen és könnyedén nyomon követhetjük elektrokémiai mérő módszerek segítségével. Az enzim immobilizációja az elektródfelületen nehézkes, ezen segíthet a polimer. A cél egy olyan, kronoamperometriás elven működő bioszenzor létrehozása, mellyel a különféle fenolos komponensek detektálhatók. (Sensors and Actuators B 97 (2004) 132–136)

7. Nanotechnológia a borászatban

Az elsődleges cél a bioszenzorok előállítása a borkészítők számára, a másodlagos cél, hogy minden összetevőt (amelyeket bonyolult vagy drága kimutatni a jelenlegi analitikai módszerekkel) analizálhassanak a borban, a harmadik cél pedig az elemzés rugalmassága (egy akkumulátorral működtetett elektronikus egység akár távoli helyen, akár közvetlenül a pincében is használható). A termék központja egy bionanokompozit alapú elektróda, például egy töltőanyagból (biomolekulák), nanorészecskékből/nanocsövekből és egy, a borban lévő célmolekulákat felismerő enzimből álló kompozit. A problémát az jelenti, hogy az enzim alapú eszközöknek alacsony a tárolási stabilitása (környezeti hőmérsékleten), így hűtött szállítást és raktározást igényelnek. Mivel rendkívül stabil és szelektív bioelektróda előállítása a cél, felmerül a nanokompozitok alkalmazhatósága. A fent említett összetevők kombinációja a bionanokompozit mátrixán belül tökéletesíti a hagyományos bioszenzorok jellemzőit, miközben növeli az érzékenységet és az észlelés szelektivitását. A mátrixban levő enzimek stabilitása órási (környezeti hőmérsékleten több hónap), ez kétségtelenül egyszerűsíteni fogja a bioelektródák raktározását és szállítását.

8. Piaci helyzet

A nanokompozitok felhasználása a világon évente átlagosan 18,4%-kal nő, 2003-ban 90,8 MILLIÓ USD forgalmat bonyolítottak le ebben a szektorban. A hőre lágyuló és hőre keményedő kompozitok töltőanyagai évtizedekig az ásványi anyagok, fémek és szálak voltak, amelyek növelték a szilárdságot, a rugalmassági modulust és a hőállóságot. Jelenleg a felhasznált töltőanyagok mennyisége nagyjából megegyezik a hőre lágyuló műanyagok mennyiségével. A nanoméretű szemcséknek, szálaknak és lemezeknek sokkal nagyobb a fajlagos felülete, mint a hagyományos töltőanyagoké, ezáltal javulnak az ilyeneket tartalmazó kompozitok fizikai tulajdonságai, mivel a töltőanyag kapcsolatot létesít a gyantával vagy a műanyaggal. Érdekes, hogy bár a polimer nanocsövek jelentős figyelmet kaptak az elmúlt években, valódi felhasználásukat nehéz megállapítani. A nanokompozitokkal folytatott sikeres kísérletek száma viszonylag kevés, mégis hatással vannak a gyártókra. Az 1990-es évek vége óta például az Amerikai Egyesült Államokban gyártott majdnem minden autóban található poliamid/szén nanocsökeverék, mert megvédi az üzemanyag-ellátó rendszert a sztatikus feltöltődéstől. Európában az építkezéseknél növekvő mennyiségben használnak nanoméretű agyagásványokkal kevert égésgátolt polimereket. A hőre lágyuló és hőre keményedő nanokompozitok mennyisége jelenleg közel azonos, ugyanakkor a fenti tanulmány megállapítja, hogy a jövőben a hőre lágyuló nanokompozitok már a piac nagyobb hányadát fogják kitenni.

9. Nanotechnológia az orvoslásban

A Perio Chip egy biokompatibilis, önállóan lebomló filmréteg, melyet nagyfokú ínygyulladás, ill. gyökérgyulladás fennállása esetén alkalmaznak kiegészítő kezelésként. Ezt a filmréteget az íny alá, a gyulladt részhez helyezik fel és ott lokálisan fejti ki gyógyító hatását. Képes a baktériumok megölésére, illetve a benne

jelenlevő hatóanyagok segítik a gyulladt terület regenerálódását. Klór-hexidin-glükonátot tartalmaz, ennek köszönhető a magas biológiai hatásossága.

10.5. ábra - Perio chip.

A nanokompozit alapú fogtöméseknél a részecskék mérete a nanométeres nagyságrendbe esik. A szilícium-dioxid részecskék nagysága 20 nanométer, a cirkóniumrészecskék nagysága 4–11 nanométer, így szilárdságuk, illetve kopási ellenállásuk jobb lett. Más esetekben a szokásos tömőanyagba olyan mikrogömböket kevernek, amelyek foszfát- és kalciumionokat bocsátanak ki, ezzel erősítik a fog kristályszerkezetét és megvédik azt a savas hatástól. Viszonylag sok ilyen részecskére van szükség, ezek mechanikailag gyengék, ezért idővel a teljes tömés meglazul. Az új nanokompozitba 50 nanométeres részecskéket vittek be, ebből több stabilizáló ion szabadul ki, és a tömésen belül kevesebb helyet foglal el, ezért több hely marad az erősítőanyag számára.

A HIV- és hepatitisvírusok kimutatásához használhatók a ferromágneses részecskék (például a magnetit), melyek polimerbe bekeverve is mágnesezhetők külső mágnessel. Ennek oka a részecskékben lévő dipólusok orientációja. Ha a mágneses hatás megszűnik, a dipólusok rendezettsége is felbomlik, és a polimer is elveszíti mágneses jellegét. A Leibnitz Institute for New Materials (INM, Saarbrücken) ezt az elvet alkalmazza HIV- és hepatitisvírusok automatikus kimutatásához. Az intézetben a nanoméretű ferromágneses részecskéket üvegszerű (szilánalapú) anyagba ágyazzák, amelyből mikroméretű golyókat (nanokompozit-mikrorészecskéket) készítenek, amelyek erre a célra kialakított felülete specifikusan megkötí a vírusok DNS-ét. A DNS-t tartalmazó mikrogömbök mágnessel kiemelhetők a vérmintából, és felhasználhatók a további vizsgálatokhoz.

10. Nanokompozitok a repülésben

A „láthatatlan repülőgépnél” a burkolatot a közép-oroszországi Kaluga megyében található Obnyinszkban a Technológiai Társaság szakemberei fejlesztették ki. Az anyag fő titka az, hogy több fém: aranyat, indiumot és ónt használnak a bevonatozás során. Egy-egy réteg vastagsága nem haladja meg a 20 nanométert, a kész bevonat pedig a 90 nanométert. Egy-egy repülőgép befedéséhez körülbelül 2 gramm arany szükséges. A fő feladat az volt, hogy elrejtse a repülőgép pilótakabinjának berendezését a radaroktól. Míg a repülőgép szárnyait és testét kompozitanyagok fedik, addig a kabinon át a repülőgépet könnyen észlelhetik a korszerű radarkészülékek. Az arany-ón-indium ötvözet kialakítása az új nanoburkolatban a különböző anyagok spektrumának válogatása révén történt.

10.6. ábra - A láthatatlan repülőgép.

11. Nanokompozitok az energiatárolásban

A Li-ion akkumulátor létrehozásával először M. S. Whittingham foglalkozott az 1970-es években. Ezek még költséges titán-szulfid katódot és fémes lítiumanódot tartalmaztak. A fémes lítium kisebb üzemzavar hatására is hajlamos volt villámsebessen felforrósodni, és ez az akkumulátor felrobbanásához vagy elolvadásához vezetett. Használható formában a Bell Labsnál a nyolcvanas években sikerült ilyen akkumulátorokat előállítani grafitanód alkalmazásával. Kereskedelmi bevezetését a John Goodenough által vezetett kutatócsoport munkája tette lehetővé, amely a katódot többrétegű lítium-kobalt-oxid anyaggal valósította meg. Erre alapozva az első lítiumion-akkumulátorokat a Sony jelentette meg 1991-ben. Ezekben a töltés tárolásáról lítiumionok gondoskodnak: töltéskor a negatív, szénalapú elektródához (anód), kisütéskor pedig a pozitív, fém-oxid elektródához vándorolnak. Az anódot és a katódot elválasztó elektrolit LiPF₆, vagy újabban a kevésbé korrodáló LiBF₄, általában folyékony, szerves oldat formájában. Az anód hagyományosan grafitból készül. Az elképzelések szerint minél hatékonyabban képesek a lítiumionok belépni az elektródákra a töltési/kisülési ciklusok alatt, annál nagyobb lesz az akkumulátor kapacitása, emiatt felvetődik a szilícium használata. A grafitanódok részecskemérete 15-20 mikronig terjed. Ekkora méretű szilíciumrészecskékkel helyettesítve a grafitot az expanzió és kontrakció (a lítiumionok belépése és távozása során) töréseket eredményez az elektródon, ami gyors meghibásodáshoz vezet. A megoldás egy új szilícium-szén kompozit előállítása (2010) a meghibásodás kiküszöbölésére. A nanokompozit bötöm-up, önrendező technikával készül, ezáltal olcsó és egyszerű előállítani. Az új anódok kapacitása a grafitból készültének több mint ötszöröse, és a gyártás

kompatibilis a jelenlegi elemek gyártási módszerével. Segítségükkel egy adott akkumulátor méretéből nagyobb teljesítményt lehet kihozni, vagy kisebb akkumulátor is elég a szükséges energia előteremtéséhez.

10.7. ábra - A Li-ion akkumulátorok kisülési folyamata.

10.8. ábra - Grafénrétegekből álló energiatároló eszköz.

10.9. ábra - A papírelem egy cellulózmátrixú anyag, amely irányított szén nanocsöveket tartalmaz. Ezek elektródokként funkcionálnak, így téve lehetővé az energiatárolást.

10.10. ábra - Szilícium–szén nanokompozit-szemcse (fekete rész a szén, a kék a szilícium).

12. Felhasznált irodalom

J. G. Smith: Preparation and properties of nanocomposites from pristine and modified swcnts of comparable average aspect ratios; In-Situ Oxygen-Atom Erosion Study of a Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane Polyurethane Copolymer, Report; Composites Science and Technology 65 (2005) 741–748; Journal of Hazardous Materials 169 (2009) 933–940; Sensors and Actuators A 178 (2012) 94– 99; Sensors and Actuators B 81 (2002) 277–282; Sensors and Actuators B 97 (2004) 132–136; Adv. Mater. 19 (2007) 1309–1319; Macromol. Rapid Commun. 25 (2004) 1359–1364; J. Phys Chem B 110 (2006) 21473; Chem. Mater. 15 (2003) 3385–3394; Composites Science and Technology 65 (2005) 741–748; Surface and Coatings Technology 80 (1996) 151–156; Procedia Engineering 25 (2011) 140 – 143; ChemSusChem 3 (2010) 136 – 168; Sensors 5 (2005) 258–265; Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry 1 (2009) 47–61; A XXI. század technológiája a nano, Műanyagipari szemle, 2010, 3; http://hungarian.ruvr.ru/2012_03_26/69665958/; <http://newscenter.lbl.gov/news-releases/2011/07/27/graphene-sandwich/>; <http://www.qmed.com/mpmn/article/lithium-ion-batteries-are-poised-energy-boost>; <http://news.rpi.edu/update.do?artcenterkey=2280>; Tudományos Diákköri konferencia, Szeged 2008

13. Ellenőrző kérdések

Mit nevezünk szenzornak? Milyen fajtái vannak a szenzoroknak?

Mutasson be 1–1 példát a szenzorok különböző típusaira!

Hogyan használhatók a nanokompozitok a fogászatban?

Hogyan mutatható ki a HIV- és a hepatitisvírus nanokompozitok segítségével?

Miért láthatatlan a láthatatlan repülőgép?

Milyen bevonatokat használunk és miért előnyösek ezek?

Melyek a termoelektromos nanokompozitok?

Hogyan használhatók a nanokompozitok az energiatárolásban?

Hogyan lehet javítani az akkumulátorok tulajdonságait nanokompozitok alkalmazásával?

Mutasson be egy grafén nanokompozitot és annak előállítási módját!

11. fejezet - A nanokompozitok alkalmazásai 2

1. Nanokompozitok a biomimetikában

A biomimetika olyan különböző biológiai rendszerek szerkezetének és funkciójának tanulmányozása, melyek modellként szolgálnak különböző anyagok és eszközök formatervezésénél, ill. mérnöki megtervezésénél, azaz biológiailag inspirált tervezés: ember által indukált folyamatok, gyártott anyagok, eszközök és rendszerek, melyek a természetet imitálják.

A biomimetika célja, hogy az élőlények felépítését és mechanizmusait gyakorlati szinten megvalósítsák mesterséges anyagokban, gépekben, mintegy lemásolva az evolúció által évmillióig tökéletesített természetes szerkezeteket. Elvárás, hogy a természetben megtalálható formákat, folyamatokat létrehozassuk, majd felhasználjuk őket, ezáltal akár energiát is spórolva. A lehetséges imitálási módszerek közé tartozik a kémiai anyagok előállítási módszerének utánzása, melyek állatokban, illetve növényekben zajlanak le; olyan mechanizmusok másolása, melyek a természetben fordulnak elő (például tépőzár, „Gecko tape”), a szervezési elvek felhasználása, melyek az állatok szociális viselkedésében jelennek meg (hangyák, méhek, mikroorganizmusok).

A „biológiai szabadalmak” gondolata Dr. Julian Vincenthez (Centre for Biomimetic and Natural Technologies, University of Bath, Anglia) kötődik. Adatbank létrehozása, mely tartalmazza a természetben megtalálható formákat, és technológiákat, így a „természetes megoldásokat a technológiai problémákra”. Az adatbankban a keresés nem az állat vagy növény neve alapján, hanem a kizárólagosan mérnöki szemmel megfogalmazott technikák szerint történik, kulcsszavak alapján (például „meghajtási mechanizmusok”, melyeket az állatok használnak), tulajdonságok alapján (például a legyen/ne legyen lehetőség a „gravitáció legyőzése” kulcsszóval kombinálva szállni képes vagy nem képes élőlényeket adja eredményül.) A biomimetika „termékei” közé tartozik például a tépőzár, illetve a modern nanotépőzár, a Speedo FastSkin cápabőr-szerkezetű úszódressz, valamint a kiváló tapadási tulajdonságokkal bíró „Gecko tape” előállításá szén nanocsövekből.

A tépőzár („Velcro”) George de Mestral nevéhez fűződik (1947), aki a bogáncs „horgos-hurkos” működéséből merítette az ötletet. 1958-ban szabadalmaztatták az Amerikai Egyesült Államokban, és a NASA az űrruhák zárásához használta. Gyártása a szövással kezdődik, majd a kikészítést követően a hurkos / horgos szalag kezelésével és színezéssel zárul. A tépőzár sikere adta a nanotépőzár („nano-velcro”) ötletét.

11.1. ábra - A tépőzár szerkezete.

11.2. ábra - A nanotépőzár működése.

A nanotépőzárak a tépőzárak nanoszkopikus másolatai. Olyan szén nanocsövekből állnak, amelyek rugalmasak, így alakjukat megtartják záraskor és nyitáskor is. A nanocsövek szilárd felületekre vannak elhelyezve. Az egyfalú szén nanocsövekben a hexagonok pentagon-heptagon párokra való cserélése permanens kötést okoz a csőben, és megváltoztatja annak kiralitását. (Physical Review Letters, Vol. 91., No. 16., 165503)

Az ember bőre bámulatos anyag: vízálló, lélegző, önjavító, egy dologra viszont kevésbé alkalmas, az úszásra. A víz nem áramlik simán a bőrfelszín mellett, jórészt azért, mert a bőr (a vízfelvétel miatt) bizonyos vízben töltött idő után elkezd ráncosodni. A bőrből kinövő szőrszálak még jobban rontják az úszóteljesítményt. A cápák úszáshoz alkalmazkodott bőre egészen más. A testfelületet apró, úgynevezett placoidpikkelyek borítják, amelyek tökéletes vízáramlást tesznek lehetővé. Ezt a tulajdonságot kihasználva kezdtek tervezni a Speedo sportszergyártó cég mérnökei olyan egész testet beborító, testhez simuló úszódresszeket, amelyeket parányi, V alakú csatornák borítanak, így a ruha felszíne nagyon hasonló a cápák pikkelyes bőréhez. A Speedo mérései szerint ezek a Fastskin („gyorsbőr”) nevű ruhák akár 3 százalékkal is felgyorsíthatják az úszókat. Természetesen a többi sportszergyártó cég is beszállt az úszók kegyeiért vívott harcba. Úgy tűnik azonban, hogy a

cápadresszeknek hamarosan leáldozik, mert a FINA Nemzetközi Úszó Szövetség szigorú előírásokkal korlátozza a szuperruhák versenyeken való viseletét.

11.3. ábra - A cápabőr szerkezete.

11.4. ábra - A cápabőr utánzása az úszódresszeknél.

Az előnyös aerodinamikai tulajdonságok miatt felmerült az igény arra, hogy a repülőket is hasonló szerkezetű festékekkel vonják be. Ezekkel a „cápaőr-festékekkel” szemben igen magas követelményeket támasztottak: $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérséklet-ingadozást kell elviselniük, ellenállónak kell lenniük az intenzív UV-sugárzással szemben, és el kell viselniük a nagyon gyors sebességekből származó igénybevételt. Az IFAM Bremen olyan festéket állított elő, mely nem csak ezen követelményeknek felel meg, hanem csökkenti az aerodinamikai ellenállást is. Találmányukban nanorészecskéket alkalmaznak, melyek biztosítják a hőmérséklet-változással, az UV-sugárzással és mechanikai hatásokkal szembeni ellenállást megfelelő hordozóra helyezve. A festék felvitele nem a szokásos módon történik, hanem egy festőminta segítségével, így tudják biztosítani a cápaőr mintázatát. A „cápaőr-festék” számos előnnyel járhat: a repülőgépeknél és a hajóknál egyaránt üzemanyag-megtakarítást eredményezhet, védelmet nyújthat az algák és a moszatok ellen, valamint szélturbinák esetén a kisebb légellenállás következtében növelheti a hatásfokot. (<http://ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-EN-Lacktechnik-Riblet.pdf>)

A gekkók a nanotechnológia „úttörői”, képesek a legsíkossabb felületeken is könnyedén megkapaszkodni. Korábban azt hitték, hogy ragasztót választanak ki, azonban kiderült, hogy a talpukat sok milliónyi keratinszál borítja, mely valamilyen felszínnel érintkezve van der Waals-kölcsönhatást alakít ki. A sok millió szőrszál együttes hatása gondoskodik a nagy tapadóerőről.

11.5. ábra - A gekkótalp szerkezete.

11.6. ábra - Rendezett szén nanocsövek mikromintázatos átvitele egy szalagra.

11.7. ábra - A „gecko tape” szerkezete.

A University of Akron rendezett szén nanocsöveknek egy szalagra történő mikromintázatos átvitelével fejlesztette ki a „gecko tape”-et, mely 36 N/m^2 nyírófeszültséget bír ki (ez négyszer nagyobb a gekkó lábának értékénél). A találmány hasznos lehet a mikroelektronikában, a robotoknál és lehetséges az űrbéli alkalmazása is. A rendezett szén nanocsövek növesztéséhez három lépés szükséges: fotolitográfia, katalizátor felhelyezése és kémiai gőzök rápárolgatása a rendszerre. Az első lépés után elektronsugarat alkalmaznak egy 10 nm vastag Al pufferréteg Si vagy Si/SiO₂ lemezre történő felviteléhez. Ezután erre a rétegre $1,5\text{ nm}$ vastag vas katalizátorréteg kerül fel, mely elősegíti a szén nanocsövek növekedését. A kémiai gőzök egy csökemencében kerülnek rá a rendszerre egy alumínium reakciócsőben. A rendezett szén nanocső-filmek etilénnek a katalizátorfilmen történő termikus dekompozíciójával készülnek $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, Ar/H₂ gázkeverék-atmoszférában. A nanocsövek növekedése során kis koncentrációban vízpára is került a rendszerbe a gázáram segítségével (harmatpont: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). A szén nanocsövek növekedésének ideje $10\text{--}30$ perc, majd a reakció végén $200\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$ hosszúságú és körülbelül 8 nm átmérőjű szén nanocsöveket kapunk. (PNAS, Vol. 104, No. 26, 10792–10795, June 26, 2007)

A tisztaság jelképének tartott lótoszvirág leveleiről minden nedvesség leperreg, és semmilyen szennyeződés nem tapad meg rajtuk. A lótoszhatás a mikrostrukturált hidrofób (víztaszító) felület következménye.

11.8. ábra - A lótoszhatás.

Ezt az elvet alkalmazva nano high-tech bevonat készíthető a következő anyagokra: üveg és kerámia, beton és kő, textil és fa, fém és műanyag, ipari termékek, hajók és autók, konyhai és szaniteráruk. Mivel a nanorészecskék igen parányiak, így a kezelt felületen semmilyen negatív változást, fényhajlást vagy fénytörést nem lehet észrevenni, kivéve a kívánt tiszta csillogást. A réteg részecskéi részben a kezelt felülettel alkotnak kémiai kötést, míg másik részük a levegővel. A részecskék önszerveződése révén egy extravékony, üvegszerű felület alakul ki, kimagasló ellenállóképességgel.

A nanobevonat felületek kezelésére is használható. A bevonat alkalmas kő- és fafelületek, éppúgy mint terrakotta, márvány, mész- és homokkő, valamint nemesfa bútorok kezelésére, emellett üvegfelületeken is alkalmazható. A bevonat színsemleges, lég-, és páraáteresztő, vízbázisú, oldószermentes és UV-álló. Ellenáll a szennyeződések, víz és olaj hatásainak, véd a korhadástól. A bevonat eredményeként jelentősen csökkentheti a tetőablakok, ablakkeretek, napelemek, télikertek stb. tisztításának költségeit. A kezelt felületek öntisztulókká válnak, azaz a lerakódott szennyeződések az eső, vagy egy egyszerű locsolás könnyedén eltávolítja, ezáltal idő, energia és pénz takarítható meg. Ideális megoldás kirakatok, üveghomlokzatok, üvegházak, autósalonok nagy üvegfelületeinek kezelésére, de lakóépületeknél is rövid idő alatt megtérül az alkalmazása.

2. Nanokompozitok az építőiparban

A nanotermékeket folyamatosan tökéletesítik, évről évre egyre nagyobb az anyagok felhasználási köre. A termékek mára a gyakorlatban is bizonyították, hogy kiválóan alkalmazhatók üveg-, kerámia-, kő- és betonfelületekhez, vakolatokhoz, falazatokhoz is. A nanoeljárás egyik legjelentősebb alkalmazási területe az építészeti üvegek felületkezelése, tökéletes bevonatot jelent az összes külső és belső üvegfelületen. Magas épületeknél, az üveg- és függönyfalaknál a baktériumok, a mohák és az algák ellen is védelmet jelent a bevonat. Léteznek már nanotechnológiás építőipari ragasztók is, amelyek előnyös tulajdonságaik mellett szállítási és raktározási szempontból is kifizetődőek, hiszen kisebb kiszorításban nagyobb felület burkolásához elegendő anyagot tartalmaznak. Homlokzati festékbevonatoknál is alkalmazható a technológia: ötvözik a szilikát és diszperziós festékbevonatok előnyeit, azok hátrányai nélkül, rugalmasak, jól tűrik a meleget, nem repedeznek, ugyanakkor vonzzák a vizet. Ezáltal az esőben az esetlegesen megtapadt szennyeződések a szétterülő vízcseppek lemosásukkal a homlokzatról, valamint az eső elállta után a megtapadt vékony vízfilm nagyon gyorsan elpárolog, ez megakadályozza a penész- és algaképződést.

A nanokompozitok építőipari felhasználását befolyásoló tényezők a költségek, a műszaki teljesítmény (a műszaki előírásoktól függ, hogy mennyire alapvető ez a szempont), valamint az iparág tájékozottsága. A nanotermékek jóval drágábbak mint a nem nanotechnológiát alkalmazó alternatívák, ez a költséges gyártási technológiának tulajdonítható. Az építőiparban ez azt jelenti, hogy már a termék kutatási és fejlesztési szakaszában leállítják a kezdeményezéseket, amikor az előrejelzések szerint a gyártandó nanotermék ára soha nem lesz versenyképes. A kilogrammonkénti kis árkülönbségek ugyanis már hatalmas összegeket jelentenek egy egész épület elkészítésénél. Az építőanyag-gyártók vonakodnak a nanotermékek kifejlesztésétől, a kifejlesztett termékeket csak eseti igény esetén alkalmazzák: vonakodnak beton, habarcs, burkolóanyagok esetén, nem vonakodnak szigetelőanyagok, műépítészeti és üvegburkolók esetén (az éghajlatváltozást és az üvegházhatást okozó gázkibocsátások csökkentése miatt, az energiagazdálkodás feljavítására). A műszaki teljesítmény szempontjából meghatározó, mennyire szigorúak az előírások az összetételre vonatkozóan (beton esetén például szigorúak, üvegbevonatoknál kevésbé).

11.9. ábra - Napjainkban akár egy átlagos ház szinte minden részében jelen lehetnek nanotermékek.

A leggyakrabban alkalmazott nanorészecskék a következők. A szén-fluorid polimerek (CF-polimerek) víztaszítóvá és olajtaszítóvá teszik a felületeket, általában ablakfelületeken alkalmazzák. A titán-dioxidot (TiO₂) védőréteggé használják az UV-degradáció ellen, segítségével lebonthatók a szerves szennyezőanyagok, például az algák, a policiklikus szénhidrogének és a formaldehid. Általában bármilyen UV-védett felülettípusra alkalmazzák, melyek így öntisztítókká válnak, vagy a légszennyezés csökkentéséhez járulnak hozzá. A szén nanocső (CNT) a mechanikai erősítést szolgálja. A cink-oxid (ZnO) a titán-dioxidhoz hasonló fotokatalitikus jellemzőkkel bír, ezért hasonló célokra alkalmazzák. A szilikapernye (amorf SiO₂) tömöríti a betont, szilárdabbá és ellenállóbbá téve azt bázikus, például tengervízi környezetben. Betonhoz adagolva hézagkitöltő anyagok, például szállópernye stabilizálására, valamint tűzgátló anyagként is használható. Leggyakoribb

alkalmazásai az UHPC (ultramagas szilárdságú beton), karcolásálló burkolatok létrehozása és a tűzálló üveg. Az ezüst (Ag) baktériumölő hatású. Az alumínium-dioxid (Al_2O_3) olyan burkolóanyagoknál használatos, melyek kölcsönhatásba lépnek a kötőanyaggal, magas karcállósággal ruházva fel azokat. Cementalapú és betonanyagok a TiO_2 és a szilikapernye kompozitanyagok használatosak kis mennyiségben és kétrétegű rendszerekben, csak olyan esetekben, amikor ez a teljesítmény feljavítása érdekében kifejezetten szükséges. Kiemelkedő a TiO_2 -tartalmú fotokatalitikus cement, melyet kötőanyagként használnak például külső falaknál, alagutaknál, betonfödémeknél, kövezetköveknél, burkolólapnál, tetőcserépénél, útburkolati jeleknek szánt festékanyagoknál, betonpaneleknél, gipszvakolatoknál és cementes festékanyagoknál.

A hollandiai Hengelo városkában épül az első olyan út, melyet légtisztító betonnal burkolnak. A kísérlet áttörést jelenthet a növekvő környezetszennyezés elleni küzdelemben, vélik a technológiát kifejlesztő kutatók. Az adalék napfény jelenlétében megkötí az autók által kibocsátott káros nitrogén-oxid-részecskéket, és ártalmatlan nitrátokká alakítja azokat. Jelmondatuk: „Egyetlen zápor mindent tisztára mos”. Az út egy 1000 négyzetméteres szakaszát ezzel az új légtisztító hatású betonnal burkolták le 2009 őszén, mellette viszont a régi, hagyományos útburkolatot alkalmazták azonos nagyságú területen. Az új anyag a nitrogén-oxid-koncentrációját 25–45 százalékkal csökkenti, ezáltal valós körülmények között is hozza a laboratóriumban produkált eredményt. Működési elve röviden azon alapul, hogy a gépjárművek által kibocsátott nitrogén-oxidokat a beton titándioxid-tartalma egyszerű nitráttá alakítja, amelyet az eső lemoshat az útról. A nitrogén-oxid veszélyes anyag, hozzájárul a légszennyezéshez és a savas esők kialakulásához is. A kövek egyben az öntisztulásnak köszönhetően tovább ellenállnak a szennyeződéseknek és az algáknak, ráadásul alkalmazásuk a fejlesztők számításai szerint egy útburkolás teljes költségét mindössze 10 százalékkal emelné meg.

11.10. ábra - Az öntisztító utcakő.

Az építőiparban a nanofestékeknek és a nanotechnológiát alkalmazó burkolóanyagoknak van a legnagyobb sikerük. A nanorészecskék jobban lépnek kölcsönhatásba az alapfelülettel, mint a nagyobb szemcseméretű megfelelőik, mivel mélyebbre hatolnak be, jobban lefedik azt és a burkolat-felület kölcsönhatás fokozottabb, ami tartósabb felületburkolást eredményez. A nanorészecskék a látható fény szempontjából átlátszók. Az átlátszóság lehetővé teszi újszerű adalékok használatát, melyek újabb jellemzőkkel – például nagy karcállósággal vagy UV-ellenállással, IR-elnyeléssel vagy -visszaveréssel, tűzállósággal, elektromos vezetőképesseggel, baktériumölő és öntisztító jellemzőkkel – ruházzák fel a különben átlátszatlan burkolóanyagokat. A speciális burkolóanyagok között megtalálhatók a baktériumölő burkolók (Ag, TiO_2 , ZnO adalékolásával), a fotokatalitikus, öntisztuló burkoló (TiO_2 , ZnO adalékolásával), a tűzálló burkolók (SiO_2 adalékolásával), a karcálló burkolók (SiO_2 , Al_2O_3 adalékolásával).

A nanotechnológia alkalmazásával a Graboplast kifejlesztette a Grabo Silver Knight rugalmas padlóburkolót, amely megoldást nyújt az egészségügy legsürgetőbb problémájára, a kórházakban terjedő fertőzésekre. A kórházi fertőzéseket vírusok, gombák és baktériumok okozzák, s ezek közül a „szuperbaktériumoknak” nevezett kórokozók a legveszélyesebbek. Mára ugyanis a kórokozó baktériumoknak olyan törzsei fejlődtek ki, melyek szinte minden használatban lévő antibiotikummal szemben ellenállóak (rezisztensek). Ilyenek lehetnek például a Gram-pozitív baktériumok (mint például a staphylococcusok vagy enterococcusok), amelyek tüdőgyulladásért és más, sokszor halálos kimenetelű betegségekért felelősek. A legveszélyeztetettebbek az idős vagy legyengült immunrendszerű, intenzív és rehabilitációs osztályokon fekvő betegek. Ezek multirezisztens kórokozók, tehát a gyógyszerári forgalomban kapható antibiotikumok többségére nem reagálnak. Csak néhány, nagyon drága gyógyszerre érzékenyek, így az általuk előidézett betegségek kezelése hosszadalmas, nehézkes és rendkívül költséges. A szuperbaktériumok jelentette fenyegetés hatására az egészségügyben már megjelentek az antibakteriális orvosi műszerek, gyógyászati segédeszközök, illetve egyéb berendezési tárgyak, például falburkolók, kilincsek. Önfertőtlenítő felület például a nanoezüst és nanotitándioxid részecskék alkotta kettős védelmi rendszer. Az ezüst antibakteriális tulajdonsága már több mint 3000 éve ismert, melyre jó példa az ezüst evőeszközök és edények használata. Az orvosok a 19. század vége óta fertőtlenítőszerként is használják az ezüstöt. Az antibakteriális hatás tehát mindenféle vegyszer használata nélkül érhető el, hiszen az ezüstionok blokkolják a sejtcella-osztódást, és megszakítják az enzimek anyagcseréjét. Az első védelmi vonal, azaz a nanoezüst alkalmazásával a baktériumok ugyan elpusztulnak, de a felületen maradványok ezek egy „biofilmet” képezhetnek, mely viszont táptalaja lehet új baktériumok növekedésének. A második védelmi vonal ezt akadályozza meg: a nano-titándioxid, amely fotokatalitikus, fénnyel történő aktiválás révén fejti ki hatását, vagyis hasonló elven működik, mint a növények klorofillja. A titán-dioxid hatására lejátszódó kémiai oxidációs folyamat a kórokozókat, valamint a szerves szennyeződések ártalmatlan összetevőikre bontja. A felületről eltűnnek, eloxidálódnak a kórokozók, valamint a szerves szennyeződések is. A folyamathoz mindössze normál nappali fényre, oxigénre és a levegőben lévő páratartalomra van szükség. Az öntisztuló felület a következőket

jelenti: jelentősen könnyebb tisztítás, kevesebb tisztítószer használata, a környezeti egyensúly fokozása, meghosszabbodott tisztítási időintervallum, a legmagasabb fokú tisztaság a termék környezetében. A fotokatalitikus öntisztuló felületek viszonylag új jelenségnek számítanak, amelyek felülmúlják az „easy-to-clean”, azaz könnyű takaríthatóság tulajdonságát. Ez természetesen nem azt jelenti, hogy a padlóburkolót egyáltalán nem kell takarítani, megfelelő karbantartás, tisztítás továbbra is szükséges, viszont könnyebbé válik a felület tisztán tartása. Elegendő fény hatására ugyanis a nanoméretű TiO_2 megnöveli a felületi feszültséget, így a felszín hidrophil tulajdonságúvá válik. Más szóval a burkolat nem taszítja a vizet, így az nem cseppformában jelenik meg, hanem szétterül rajta, ezáltal a felületen a szennyeződések kevésbé tapadnak meg, könnyebben eltávolíthatók. A Grabo Silver Knight öntisztuló tulajdonsága következtében az egészségügyi intézmények takarítási ciklusai jelentősen ritkúlnak, kevesebb tisztítószer használata mellett a padlóburkolatok is kevésbé használnának el. A nanotitán-dioxid használata további pozitív tulajdonsággal ruházza fel a Grabo Silver Knightot, lehetővé teszi ugyanis a levegő minőségének javítását is, hiszen a fotokatalízis segítségével a kellemetlen szagok, vagy például a nikotin és a formaldehid is semlegesíthetők. A Grabo Silver Knight speciális padló teljesen új utat nyit az egészségügy területén, hatékonyságát laboratóriumi vizsgálatok sora bizonyította. Kórházi eredetű baktériumok, vírusok és gombák következtében évente közel százezer ember hal meg szerte a világon. Magyarországon egy 2006-os adat szerint több mint 3000 ember halála hozható összefüggésbe kórházi fertőzésekkel. A Grabo Silver Knight padlóburkoló alkalmazásával kevesebb betegek fordítandó költség mellett, rövidebb kórházi tartózkodással, alacsonyabb kórházi halálozási kockázatot, vagyis biztonságosabb kórházi környezetet tudunk teremteni.

A nanobevonatok számos előnnyel rendelkeznek. Ezeket általában (belső és külső) falburkolatok, fahomlokzatok, üveg és különböző útburkoló anyagok esetében használják. A bevonat nagy ellenállóképességet biztosít fa-, kő- és homlokzati felületeken, miközben teljes mértékben pH-semleges, nem mérgező, antibakteriális és antiallergén hatású. Az anyag ellenáll az UV-sugárzásnak, egyben páraáteresztő is. Antigraffiti-hatását a speciális tapadásgátló védelmének köszönheti. A különféle kültéri burkolatok szerkezetébe nem jut be a víz, ezáltal fokozza a fagyállóságot. Kül- és beltéri burkolatnak fokozott kopás- és karcállóságot biztosít, ezzel a burkolatokkal szemben támasztott szinte összes követelménynek megfelel. Jelentős tulajdonsága még a korrózióvédelem és további hozzáadott értéket jelent, hogy az anyaggal kezelt felületek esztétikusak, fényesek lesznek általa.

Az égésgátolt polimerek alkalmazása elengedhetetlen a közlekedésben és az építőiparban. A bányászatban és a vegyiparban antisztatikus műanyag szerkezeteket (csővezetékek, szivattyúk stb.) kell alkalmazni az elektrosztatikus feltöltődés megakadályozása, ezáltal a robbanás elkerülése érdekében. Fontos alkalmazásokat jelentenek a habképző tűzvédelmi festékek, a tűzgátló alapfestékek. A tűzgátló alapfestéknél montmorillonit és szepiolit nanoadalékok kedvezően befolyásolja a habmagasság és a habszilárdság alakulását. A montmorillonit a hab hőszigetelő-képességét nem növeli, de a szepiolit részarányának növelésével javulás várható. Segíti a gyanta szenesedését, és ezen keresztül gyorsítja hőszigetelést, valamint a kokszos habréteg kialakulását.

3. Felhasznált irodalom

Nanotermékek az európai építőiparban, State of the Art 2009, Vezetői összefoglaló; Dr. Orbán József, Nanotechnológia az építőiparban, építőanyagipari alkalmazások; White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties, 11th Int.; Congr. on the Chemistry of Cement; Phys Rev Lett 16 (2003)165503; PNAS 26 (2007) 10792

4. Ellenőrző kérdések

Mi a biomimetika?

Hogy működik a nano-velcro?

Hol, hogyan és miért előnyös a „cápabőr”?

Mi a „gecko-tape”? Milyen tulajdonságok jellemzik?

Mi a lótuszeffektus?

Hogyan alkalmazható a lótuszhatás a mindennapokban?

Az építőipar hol és milyen nanokompozitokat használ?

Hogy működnek az öntisztuló felületek?

Hol használnak nanobevonatokat az építőiparban?

A nanokompozitok milyen tűzvédelmi alkalmazásait ismeri?

12. fejezet - A nanokompozitok alkalmazásai 3

1. Forma-1

A kompozitanyagok viselkedésének megismerése sok sportágban nagyobb biztonságot eredményezett, nem volt ez másként a Forma-1-ben sem. A kompozit anyagok sikere a hatékonyság, a merevség és a súlycsökkentés biztosításában rejlik. A kutatások és a hatások megértése lehetővé tették, hogy egy kifinomult védelmi rendszert hozzanak létre a pilóták számára. A McLarennél vezették be először a kompozit alvázakat. A szabványos szerkezetek, amelyeket a F1-es karosszéria tervezéséhez használnak, két alumíniumhoz kapcsolódó vékony kompozitrétegből áll, amely nagyszilárdságú szénszál szövet-epoxi mátrixba van ágyazva. Különleges, az űrtechnológiában alkalmazott anyagokat használnak a Forma-1-es autókhoz. A legfontosabb alkotóelem a szénszál műanyag, melyből az aerodinamikai elemek készülnek. Ez az anyag kétszer merevebb, mint az acél, de ötször könnyebb annál. A szénszál anyagot „szövetként”, 50 méter hosszú csíkokban, másfél méter átmérőjű, hatalmas bálákban tárolják. Ilyenkor hasonló állagú, mint a tapéta. Ezeket a bálákat fagyasztókban tárolják –19°C-on, mivel szobahőmérsékleten megkeményedne az anyag. A szénszál műanyagot rétegenként negatív öntőformákba helyezik. Az egyes rétegeket epoxigyantával ragasztják össze, és méhsejtszerű alumíniumlapokkal teszik még merevebbé. Ezután következik a „becsomagolás”, az előkészítés arra, hogy hőkezeljék az autoklávban, amivel végül elnyeri ultraerős formáját. A szálerősítésű kompozit alvázak bevezetése a legjelentősebb fejlesztés volt a Grand Prix versenyek történetében. A technológiai fejlődés során szerzett tapasztalatok alapján speciális anyagból állították elő az autókat, hogy könnyebbek, gyorsabbak és biztonságosabbak legyenek, mint valaha. A Forma 1-es autók gyártását a kompozitok uralják. Ezeknek a speciális kompozitanyagoknak köszönhetően az autók sokkal jobb energiaelnyelő tulajdonsággal rendelkeznek, ami hozzájárul a biztonság jelentős mértékű növeléséhez. Az alváz szerkezete nagyon fontos, képes megvédeni a vezetőt a nagyobb hatásoktól. Széles körben a szénszál erősítésű kompozitok mutatják a legnagyobb merevséget a mérnöki anyagok között. Ennek következtében az F1-es csapatok arra törekednek, hogy minél több helyen alkalmazzák. A pilóták baleset közbeni túlélési esélyei növelhetőek, ha a többletenergiát megfelelően elvezetik. Ezt egy olyan alváz segítségével sikerült elérni, amely körül energiaelnyelő berendezések vannak elhelyezve a jármű stratégiai pontjainál. A különböző fejlesztésekkel nagyon sok töréstesztet hajtottak végre, volt olyan, amelynél a frontális ütközésnél kitűnően teljesített a szerkezet, de már a kismértékű oldalirányú terhelést sem viselte el. Az autók is sokkal biztonságosabbak lettek, az autók elemeinek nagy része szénszál anyagokból készül, amelyek elnyelik az ütközésből keletkező energiákat. A pilótafülke – amely lényegében a versenyző „túlélési cellájának” tekinthető –, csakúgy, mint a teljes karosszéria és a padlólemez, szénszál anyagból készül. A külső borítása nagyszilárdságú szénszál szövetből, míg a belső szerkezete méhsejt alakú formákból épül fel. A csapatok szénszál technológiával foglalkozó szakemberei számára a pilótafülke kialakítása az egyik legnagyobb kihívás. Szénszál anyagok százait kell kiszabniuk, összeilleszteniük, majd a technológiai folyamat során létrehozniuk a roppant erős pilótafülkét. A pilótafülkét körülvevő bukóváznak óriási terheléseket kell kibírniuk, hiszen az első és legfontosabb szempont, hogy a vezetőtér nem sérülhet. A tesztek során felülről kilenc, oldalról öt, hosszanti irányból hattonnás erőt fejtenek ki az autó központi egységére, és a szerkezet elemei ennek hatására legfeljebb 50 milliméteres mértékben deformálódhatnak.

12.1. ábra - Forma-1.

Miután a pilóta beöltözött teljes menetfelszerelésébe, helyet foglal a vezetőtérben, amely manapság a Forma-1-ben már teljes biztonságot nyújt. Szerencsére a legbrutálisabb balesetek után is általában sértetlenül szállhatnak ki belőle, mint például Robert Kubica, aki óriási balesetet szenvedett 2007-es montreali futamon, de a teljesen összetört autóból azonban szinte sértetlenül emelték ki, mint utóbb kiderült, mindössze bokaficamot szenvedett. A biztonsági rendszer következő alkotóeleme a versenyző vezetői ülése, amelynek nemcsak az a feladata, hogy a megfelelő pozícióban elhelyezve kényelmes vezetést tegyen lehetővé, hanem a pilóta a lehető legnagyobb biztonságban érezze magát munkája közben. Az FIA (Nemzetközi Automobil-szövetség) technikai előírásainak megfelelően az ülést mindössze két ponton lehet rögzíteni a karosszériához. A mérnökök a vezetőülés tervezése során a versenyző testalkatáról mintát vesznek, és annak megfelelően személyre szabottan készítik el az egyes üléseket. A test vonalához igazodó ülések szénszál anyagból készülnek, amelyet poliészter habbal is ellátnak annak érdekében, hogy növeljék ezzel a versenyző komfortérzetét. Ma már a vadászrepülőkéhez hasonló hatpontos biztonsági övvel szíjazzák be a pilótákat. Két heveder a vállaknál, kettő a medencénél, kettő pedig a

lábaknál rögzít. A F1-es kormány szénszálalás anyagból készül, a markolatot pedig csúszásgátló bevonattal látják el. Miután minden versenyző markolása más, mindegyiknek személyre szabott kormányja van, amelyet a csapatok házon belül készítenek el. Az egyetlen kivétel a kijelző, amely az elektronikai csomag részeként mindenkinek egységes. Egy versenyhétvégén egy pilótának minimum három kormánykerék áll rendelkezésére.

A levegő a féktárcsákon kialakított furatokon keresztül jut el magába a féktárcsába és a fékbetétekhez, mely elengedhetetlen a megfelelő hűtés szempontjából. A fékszerelvényekkel kapcsolatban elvárás, hogy könnyűek legyenek, annak érdekében, hogy a felfüggesztésen a lehető legkisebb legyen a rugózott tömeg. Ennek megfelelően egy karbon féktárcsa 1,5 kg, a fékpofák 30 dkg, egy féknyereg pedig 2,5 kg tömegű. A Formula-1 kezdeti éveiben a fékeket acélból készítették. 1982-től azonban teret nyertek a szénszálalás kompozitanyagok, melyek használatával közel negyedére lehetett csökkenteni a fékek súlyát, hiszen a szénszálal hozzávetőlegesen negyedakkora súlyú, mint a korábban használatos acél. Emellett a szénnak remek a súrlódási tulajdonsága, mely azt teszi lehetővé, hogy a fékezés hirtelenebb, és rövidebb ideig tartó lehessen. Az üzemi hőmérséklet a 400–800 °C tartományba esik. A magas hőmérsékletek miatt gyakran látszódnak az autók izzó féktárcsái. Azonban a féktárcsák és fékpofák gyártása ezekből a különleges anyagokból kimagaslóan összetett és költséges folyamat. Éppen ezért a legkönnyebb, komolyabb karbantartást nem igénylő féktárcsák kezdenek elterjedni, melyeket kerámiaerősítésű szénszálalás anyagból készítenek, ami a leginkább megfelel az acél anyagjellemzőinek.

Szintén fontos biztonsági felszerelés a Head And Neck Support rendszer (rövidítve HANS rendszer). Ez a szerkezet is szénszálalás anyagból készül. A versenyző vállára támaszkodva, annak két oldalán rögzítő szalagokkal kapcsolódik a versenyző sisakjához. Célja, hogy megakadályozza a baleset során, hogy a versenyző feje túlságosan előre lendüljön, aminek következménye lehet a nyakcsigolyák sérülése, illetve a pilóta be is ütheti a fejét a kormányba. A sisak szénszálalás rétegei a lehető legnagyobb ellenálló képességet, a fényre automatikusan sötétedő rostély a tökéletes látási viszonyokat, míg a pilóták fejformájához igazodó egyedi kialakítás a maximális kényelmet szolgálja. A sisaknak azonban az autó aerodinamikájába is illeszkednie kell. Ezért a szezon előtt a sisakokat is tesztelik a szélesatornában, és az a cél, hogy optimális légáramlás alakuljon ki a levegőbeömlő és a hátsó szárnyak irányába. Mindenkinek egyedi tervezésű sisakja van. Ennek első lépéseként a pilóta fejéről életnagyságú modellt készítenek. Ezt követően az eljárás leginkább ahhoz hasonlatos, ahogy az ókori egyiptomiak dolgoztak a múmiákon: a modellfejet szinte rétegesen körbetekerik a high-tech szénszálalás anyaggal. Amíg egy átlagos motoros bukósikak mindössze három rétegből tevődik össze, addig a Formula-1-es pilóták sisakjai tizenhét rétegből állnak. Az egyes rétegek pontos összetevői hétpecsétetes titoknak számítanak, a három fő összetevőt azonban jól ismerjük: a szénszálal, amely a keménységet adja, a tűzálló aramid és a polietilén, amelyet a lövedékálló mellényekhez is használnak, és áthatolhatatlanná teszi a sisakot. Ezeken kívül még alumíniumot, magnéziumot és kötőanyagként gyantát is találunk az összetevők között. A korszerű szénszálalnak köszönhetően a Formula-1-es sisak superkönnyű, mindössze 1,25 kilogrammos. A külső lángálló, karbonszálalakkal megerősített kemény héj alatt egy aramidréteg helyezkedik el. Ezen belül egy lágy polietilénréteg következik, amely az aramiddal együtt a külső erőbehatások tompítására szolgál. Ezen belül már csak egy vékony tűzálló réteg helyezkedik el. Mielőtt a pilóta felvenné a sisakot, a fejére húz egy láng- és hőálló maszkot is, amely szintén kötelező.

2. Tenisz, horgászat

A nanokompozitok a teniszben is megjelentek. Az 1950-es években még nehezebb fából készült ütőket használtak. A nehezebb ütő megnehezíti a labda gyors elérését, és ennek következtében a tenisz egy lassabb sport volt, mint ma. A Wilson és a Babolat kezdte fejleszteni az ütőket, a fát fokozatosan felváltotta az alumínium, a grafit, a titán és legújabbban a szén nanocsövek kompozitjai. A cégek állítják, hogy ezekkel a teniszütőkkel számottevő javulás figyelhető meg a játékosoknál. A kutatások szerint a kompozitalapú ütők kétszer olyan stabilak, kétszer olyan erősek és 22%-kal nagyobb teljesítményű, mint a hagyományos teniszütők. Az ütő teljesítménynövekedése nagy sebességek eléréséhez vezet, melynek következménye egy rendkívül gyors iramú, dinamikus játék. A kompozitütők szálerősített, nagyon rugalmas polimerből készülnek. A felhasznált rétegeket különböző anyagokból építik fel, ezek általában grafit és üvegszálal, de ritkább esetekben bőr, aramidszálal vagy az üvegszálalhoz hasonló kerámiareszecskeket tartalmazó anyag. Az aramid röviden és általánosan fogalmazva egy olyan anyag, amelynek különleges tulajdonsága, hogy dinamikus terhelésnek igen jól ellenáll. Az aramid egy másik tulajdonsága, hogy hasonlóképpen, mint a grafitnak és a szénnak, negatív a hőtágulási együtthatója. Hő hatására az aramidszálal zsugorodnak, miközben a mátrixgyanta tágul. Ennek köszönhetően az aramidszálal és -szövetek kompozitba ágyazva hő hatására tartják a méretüket, nem nyúlnak és nem zsugorodnak. A Wilson kutatásokat végzett, hogy megtalálja azokat az újításokat, amellyel javítani lehet a ma is használatos labdákat. A cél a kezdeti légnyomás megtartása minél hosszabb ideig. Piacra kerültek a Double Core tenisz labdák, melyek kétszer annyi ideig tartják a nyomást, mint a hagyományos teniszlabdák, még akkor is, ha 150 km/h sebességet meghaladó ütések érik. A Wilson új teniszlabdája csökkenti a gáz

permeabilitását belülről kifelé, így biztosítva a hosszantartó visszapattanást. A belső mag egy 20 mikron vastag nanokompozit réteggel van bevonva, amely latexpolimer és butil mikrorészecskék keveréke, melyhez vermikulitot adnak. A vermikulit természetes eredetű szilikátásvány. Az egymással párhuzamosan álló szilikát-kristálysíkok megnevelik az anyag felületét, ennek hatására jól tartja a vizet, a granulátumok közötti pórusok pedig a levegőt. Ez a keverék, egy légmentesen záródó, de még mindig rugalmas határt képez, így megakadályozza a levegő kiszivárgását a labda belsejéből. Ugyanezt a technológiát használják futball-labdáknál és az élelmiszer-csomagolásoknál, ugyanis segít lassítani a romlást, megakadályozza az íz- és illatanyagok kilépését, valamint az oxigén és az ultraibolya fény a bejutását.

12.2. ábra - Tenisz.

Az Airrus volt az első vállalat, amely szénnanocső-kompozitos horgászbótot állított elő. Ez a cég már hosszú utat megtett, jól ismeri az újszerű alkalmazásukat ezeknek a különleges anyagoknak. Szén nanocsöveket alkalmaznak, hogy tovább növeljék a botok érzékenységet, stabilitási jellemzői javuljanak, fokozzák a teljesítményt. Az első konstrukció a Co-Mátrix 457 volt, mely az első visszajelzések alapján igen tartós pecabot. Az Airrus folyamatosan lenyűgözi a horgásztársadalmat a botok továbbfejlesztésével, új utakat találnak, hogy egyedülállóan nagy hatékonyságú botot juttassanak a horgászok kezébe. A Co-matrix sorozatot követte az N-sync, amely az előzőnél is tartósabb. A nanotechnológia már megtalálható a horgászcsalik felületén is. A nagyvákuum-berendezéseket gyártó ULVAC cég 2006-ban bejelentette, hogy be kíván lépni a horgászfelszereléseket gyártó iparágba egy speciális vákuumtechnológiával kidolgozott nanobevonatos csalival. A csalik jellemzően a mozgásukkal, színükkel keltik fel a halak figyelmét, gyakran matricák, festékek tükrözik a napfényt. Ezek a hagyományos csalik csak az egyik irányba képesek visszaverni a fényt. Az új csalinál egy ultravékony optikai bevonat eredményezi a nagyfokú fényáteresztést, így színjátzó, holografikus felületet kapunk, amely megtartja fényességét a látószögtől függetlenül. Gőzfázisú leválasztással egy poliimid réteget készítenek a csali felületén, és a színárnyalatot a film vastagsága, illetve a fény hullámszáma határozza meg. Ez valósággal vonzza a halak figyelmét. Felmérések szerint 4-szer több halat lehet így fogni, mint a hagyományos csalikkal.

12.3. ábra - Horgászat.

3. Futócipők, egyéb sportok

A futócipők tervezése érdekes feladat, mert puhának kell lenniük, hogy elnyeljék a rázkódást, ugyanakkor elég keménynek is, hogy megtartsák az alakjukat. Ezt kellett a tervezőknek elérni, és a nanotechnológia bizonyult hasznosnak a probléma megoldására. Tudjuk, hogy a hosszabb sprintversenyeket meg lehet nyerni és el is lehet veszíteni a kanyarokban. Az adidas Jeremy Warinerrel több mint két évig dolgozott együtt, hogy új cipőt tervezzenek a nanotechnológia segítségével, és megeremtsék a forradalmi Lone Star szöveget. Az adidas olyan technológiát alkalmazott, amelyet eddig csak az autó- és űripárban használtak: egy szénnanocső-erősítésű lemezt hoztak létre. A Lone Star a világ első aszimmetrikus szöge, amely az első teljes hosszában nanocsővel megerősített lemez. Ahogyan a high-tech fürdőruhát, ezt az új cipőt is láthattuk már az olimpián: Pekingben Jeremy másodikként ért célba a 400 méteres távon. Úgy gondolják, hogy az egyik legfejlettebb technológiájú és legkönnyebb futócipő, amelyet valaha is használtak. Ez a vékonyabb és erősebb darab lehetővé teszi, hogy Jeremy még jobban betapadjon a kanyarokban, nagyobb stabilitást, kényelmet, biztonságot és nagyobb rugalmasságot biztosít, miközben minimálisra csökkenti az energiavesztést. Az új szög teljes hosszúsága mintegy 1/3-a a korábbinak, súlya pedig 50 százalékkal kevesebb, így a legkönnyebb szög, amelyet valaha készítettek az adidasnál. Mivel kevesebb az anyag a sportoló lába és a pálya között, az új cipő természetes mozgásra ösztönzi a lábat.

12.4. ábra - Oscar Pistorius

Oscar Pistorius dél-afrikai futó lábfej nélkül született, ezért 11 hónapos korában mindkét lábszárát amputálták. Speciális szénszálas protéziseivel ő tartja a parasportolók között a világcsúcsot 100 méteren (10,91 másodperc), 200 méteren (21,58 másodperc) és 400 méteren is. Utóbbi távon 46,34 másodperc a legjobbjá, míg Warineré 43,62 másodperc. A Cheetah Flex Foot egy egyedi építésű, nagy teljesítményű szénszálas láb, amelyet

elsősorban a sportoláshoz tervezték. A protézis kialakítását a gepárd lába ihlette, gyakorlatilag ezt másolták le. Pekingben az egészséges sportolók között szeretett volna indulni. A nemzetközi szövetség orvosi bizottsága vizsgálta, hogy a műlábak szerkezete előnyt jelent-e Pistoriusnak az épekkel szemben. Pistorius egy kölni tudományos kutatóintézetben öt év társával együtt különböző teszteken vett részt. A vizsgálatokat vezető Peter Bruggemann professzor véleménye szerint Pistorius speciális protézise előnyt biztosít az atléta számára riválisaival szemben. Ugyanakkora sebesség eléréséhez jóval kevesebb energiára van szüksége a mesterséges alsó lábszárakkal, mint az egészséges versenyzőknek – mondta a német professzor, akinek a szakvéleményét elfogadta az IAAF. A 2008-as Nyári Paralimpián 100, 200 és 400 méteren aranyérmet vehetett át.

12.5. ábra - Atlétika.

Sok golflabda- és golfütőgyártó cég áldoz pénzt a nanokutatásokba. Az új faanyagok nanokompozitokat tartalmaznak, így csökkentve az ütő súlyát, ezáltal a tömegközéppont lejjebb kerül, így biztosítva a nagyobb teljesítményt, a pontosabb és egyenesebb ütest. Ezek az ütők is szén nanocsövet tartalmaznak a nyélben. Pádraig Harrington, Írország vezető golfozója nemrég elért sikereit az új ütőnek köszönheti. Az ő labdaszedője és ütőhordója is hálás a nanotechnológiának: Harrington golftáskájának súlya 52%-kal csökkent. A NanoDynamicsnál is azon dolgoznak, hogy a nanotechnológia segítségével továbbfejlesszék a golflabdákat, ezáltal megkönnyítsék a legtöbb amatőr golfozó számára a játékot. Az újfajta golflabdák azt eredményezik, hogy a rosszul eltalált ütésnél képes a labda javítani a saját repülési útját. Ez nem csodaszer, de állítólag az enyhe eltéréseket korrigálja. Egy átlagos labda rengeteg deformáción megy keresztül: ez a nyúlás veszi el a legtöbb energiát az ütőtől, így kevesebb jut a labdának. Mivel hatékonyabbá tették az energiaátadást az ütő és a labda között, így nem veszít az emelkedéséből és a távolságból a labda.

12.6. ábra - Golf.

A foltrezisztens ruházat néhány év óta már a sportolók rendelkezésére áll, és ez az új anyag már kimondottan taszítja a fűfoltokat, így segít fehéren tartani a fehér ruházatot. Téli sportok sem maradhatnak ki a nanotechnológiából: nanoszálakat használnak szél- és vízálló kabátokban. A síléceket és snowboard-deszkákat is bevonják egy nagyteljesítményű nanoviaszzal, ezáltal gyors siklást biztosító felületet hoznak létre. A hó minőségétől és az időjárástól függően különböző viaszokat használnak.

Az egyik legnagyobb probléma a sport világában az, hogy a tornaterem, a ruházat és a sportfelszerelések kellemetlen szagúak. A sporteszközök hagyományosan az egyik legjobb táptalajai a baktériumoknak és gombáknak. Ha ezek a baktériumok és gombák ellenőrzés alatt tarthatók, akkor megakadályozhatók a fertőzések terjedése. Az ezüstöt több mint 100 éve használják betegségek orvosi kezelésére természetes antibakteriális tulajdonsága miatt. A pennsylvaniai NanoHorizons kifejlesztette azokat az ezüst nanorészecskéket, amelyek behálózják a gyapotot, a műanyagokat, a cipőket, a mezeket, a sisakokat, a zoknikat és a sporteszközöket. A nanoméretű ezüstrészecskék jellemzően 25 nm-esek. Emiatt a részecskékből kis mennyiségre van szükség, ugyanakkor nagy felületet tudnak beborítani. A nagy felület lehetővé teszi, hogy a részecskék egyszerre több gombával és baktériummal lépjenek kölcsönhatásba. A nanoezüst gátolja a légzést, az elektronszállító rendszert és a szubsztrátszállítást a sejtmembránon keresztül, így a gombák és a baktériumok növekedése, szaporodása gátolt.

12.7. ábra - A „Nanosilver” textil.

A nanotechnológia közelebb hozza a rögbrajongókat az All Blackshez, mint valaha. Az adidas egy promóciót indított Új-Zélandon, melynek keretében a rögbicsapat több ezer szurkolójának a nevét vésik fel egy szárra, amely része az All Blacks meznek. Ehhez egy nagyon hegyes ceruzára/rudacsára van szükség, amellyel milliméterenként 100 nevet lehet írni.

12.8. ábra - All Blacks mez.

Egy svájci cég szén nanocsöveket tartalmazó gyantát használ a kerékpárok gyártásához, amely százszor jobbnak bizonyult, mint az alumínium, és messze jobb, mint a szénszál. A szén-epoxi, üveg-poliészter kompozitokat széles körben alkalmazzák, például a kerékpároknál a vázat erősítik meg a segítségükkel. Hagyományos esetben ez alumínium- vagy acélötvözetből készül. A versenykerékpároknál a súlycsökkentés céljából széleskörűen alkalmazzák a szén-epoxi kompozitvázat. Így elérhető, hogy a teljes váz súlya 1 kg legyen, mely alumínium esetében körülbelül 5 kg. A szálerősítésű kompozitok mechanikai tulajdonságai tovább növelhetők a mátrix nanorészecskékkel történő módosításával.

A bowlinggolyó általában karcolásokkal fedett, ez aligha meglepő ugyanis a golyók a pálya végén nagy erővel ütköznek a bábukkal. Az egyik cég olyan nanorészecskéket tartalmazó anyaggal vonta be a golyókat, amely ellenállóvá tette a golyókat a karcolásokkal szemben, így hónapokig úgy néznek ki, mintha újak lennének.

A baseball- és hokiütőknél is – a golfütőkhöz hasonlóan – súlycsökkentés és ezáltal a gyorsabb ütükezelés figyelhető meg. A kosárlabdacipők talpán egy nanokompozitból készült kapszula figyelhető meg, amely héliummal van megtöltve, így magasabbra lehet ugrani a cipővel.

12.9. ábra - Súlycsökkentés nanoanyagok használatával.

12.10. ábra - A téli sporteszközökhöz használt hagyományos és nanoviasz összehasonlítása.

4. Felhasznált irodalom

Nanotermékek az európai építőiparban, State of the Art 2009, Vezetői összefoglaló; Dr. Orbán József, Nanotechnológia az építőiparban, építőanyagipari alkalmazások; White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties, 11th Int.; Congr. on the Chemistry of Cement; Phys Rev Lett 16 (2003)165503; PNAS 26 (2007) 10792

5. Ellenőrző kérdések

Milyen sporteszközben és milyen módon jelennek meg a nanokompozitok?

Mutassa be részletesen, hogy egy F-1-es autó esetén milyen nanokompozitokat alkalmaznak!

Hol van biztonságtechnikai szerepe is a F-1-es autónál alkalmazott nanoösszetevőknek?

Hogyan jelennek meg a nanokompozitok a ruházati cikkekben?

Milyen előnyös tulajdonságokkal jár a nanoanyagok alkalmazása a (sport)ruházati cikkekben?

Milyen mechanizmusok csökkentik a szagképződést a nanoszerkezetű sportruházatoknál?

Milyen atlétikai alkalmazásai vannak a nanoanyagoknak?

Miért előnyös a nanoanyagok alkalmazása a golf és a tenisz sporteszközeiben?

Miért előnyös a nanoanyagok alkalmazása a horgászat és a téli sportok sporteszközeiben?

Milyen sportágakban van jelentősége a nanoanyagok alkalmazásán keresztül történő súlycsökkentésnek?