

# Szénatom kapcsolódási struktúrák – a jövő kulcsfontosságú anyagai

Szabó Lóránt

Óbudai Egyetem, RKK

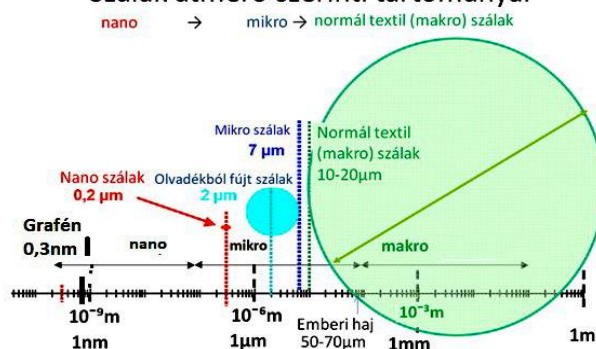
Szabó Rudolf

Rejtő Sándor Alapítvány

**Kulcsszavak/Keywords:** Szénatom, Szénatomok kapcsolódásai, Szénszál, Nanoszál, Nanocső, Grafén  
Carbon atom, Linking of carbon atoms, Carbon fibres, Nanofibre, Nanotube, Graphene

A nanotechnológiáról az utóbbi években az elméleti szakemberek és kutatók számos publikációt jelentettek meg, ami mára kezdi átlépni a kereskedelmi, a gyakorlati alkalmazás küszöbét. A nanostruktúrák több formája jelentős szerepet játszhat a kompozitiparban is. A nanotechnológia 100 nm-nél kisebb átmérőjű szálak, részecskék előállítását, tulajdonságait vizsgálja (1. ábra).

## Szálak átmérő szerinti tartományai



1. ábra

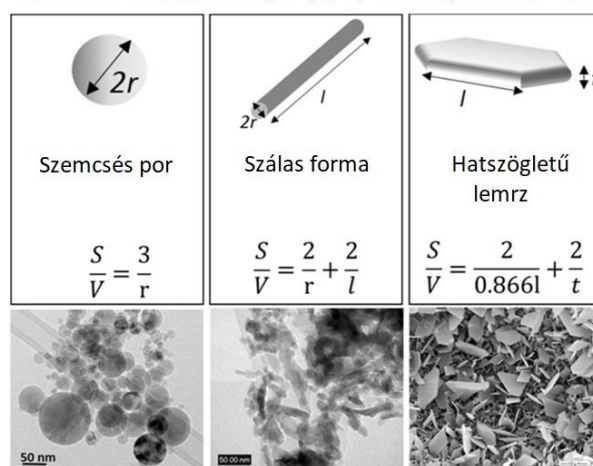
A nagyteljesítményű szálakat különböző formákban állítják elő és alkalmazzák (2. ábra).

A szálátmére csökkentésével a szálak hajlékonysága növekszik, törékenyséjük csökken, feldolgozhatóságuk



2. ábra

A különböző geometriai alakzatok esetén a méretek hatása a felület/térfogat (S/V) viszony alakulására



3. ábra

javítható és a nagyobb fajlagos felület a mátrixszal erősebb kötődést eredményez. A szálak vékonyításával a szál viszonylagos felület/térfogat (S/V) aránya növelhető, a mechanikai tulajdonságok, a feldolgozhatóság, a szál-mátrix-kapcsolódás javítható (3. ábra).

A nanostruktúrák mérete rendkívül kicsi, a nagy felület/térfogat arány akár 1:5 is lehet és ez kiemelkedő tulajdonságokat eredményez. A kisméretű (<100 nm) nanorészecskék (nanopor, nanolaszterek, nanokristályok) méretét előállításuk során golyós őrléssel csökkentik, ahol az őrlőkamrában a finomabb részek összegyűlnek. Példaként említhetők az epoxigyantában a nanoszilika részecskék használatával elérhető javulások: a nanoszilika nélküli epoxihoz képest 55%-kal nagyobb a gyanta törőszilárdsága, 17%-kal nagyobb a laminátum nyírószilárdsága és 59%-kal nagyobb a kompozit keménysége, miközben a visszaalakulás 47%-kal, a zsugorodás 33%-kal csökken.

WPC (Wood Plastic Composite – fa-műanyag kompozit) esetén a faőrlemény mérete kb. 500 μm. (A faőrlemény megnevezésére a megnövelt fajlagos felület miatt az angol irodalom ugyancsak a „fiber”, azaz „szál” kifejezést használja.)

Egyfalú szén-nanocsővek (SWCNT) 0,01%-nyi bekeverésével a

### Különböző méretű részecskék mátrixba ágyazása



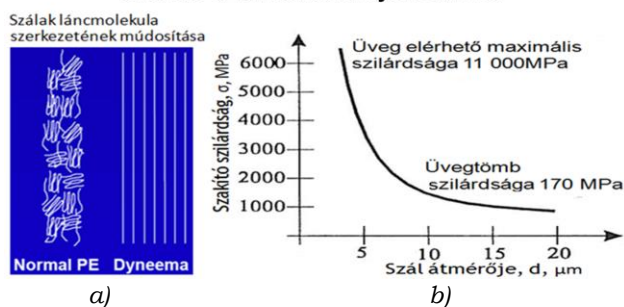
4. ábra

háromdimenziós kompozitok tulajdonságai (mechanikai, elektromos és hővezetés) számottevően növelhetők. Azonos méretű kockába ágyazás esetén a különböző méretű részecskék elrendezését a 4. ábra szemlélteti.

### Szálak szerkezetek mechanikai jellemzői

A szerves alapú mesterséges szálak gyártása során a láncmolekulákat vegyi úton állítják elő, az alapanyagok folyékony állapotát oldással vagy olvasztással érik el, a szálhúzást követően a képlékeny anyagok megszilárdulása közben nyújtással, a láncmolekulák száltengely irányú rendezésével a szálak szilárdsága, rugalmassága beállítható (5/a ábra).

#### Szálak szerkezetek jellemzői



5. ábra

Az amorf szerkezetű szálakat (üveg, bazalt, fém stb.) is folyékony állapotból kiindulva nyújtják, így a vékonyítással a nagyobb felület/térfogat arányból adódó egyenletesebb hűtésnek köszönhetően a megszilárdulás során az anyaghibák csökkentésével a szálak mechanikai tulajdonságai a tömb állapothoz viszonyítva számottevően javíthatók (5/b ábra).

A különböző tömb és szál anyagformák mevhmechanikai jellemzőit a 6. ábra szemlélteti.

A szálak hajlékonysági merevségét (EI – E az anyag rugalmassági modulusza) és döntően a szálátmérő, ill. az inerciális másodrendű modulusz (I) határozza meg (7. ábra). Például az üveg, a bazaltkő vagy az acél tömb

#### Szerkezeti anyagok szál és tömb formájú szilárdsága

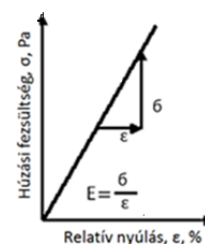
	Szén	Acél	Üveg	Polimer
Sűrűség	1.8 g/cm <sup>3</sup>	7.8 g/cm <sup>3</sup>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	1.0 g/cm <sup>3</sup>
Szilárdság Szál forma	7.1 GPa	4.0 GPa	4.0 GPa	3.20 GPa
Szilárdság Tömb forma	0.1 GPa	1.4 GPa	0.5 GPa	0.03 GPa

6. ábra

### Hajlítási merevség (EI)

E – húzási merevség (húzási rugalmassági modulusz)

Rugalmassági modulusz, E, Pa



I – inerciális másodrendű nyomaték

$$I_x = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

EI – hajlítási merevség

$$EI = M R$$

M – hajlító nyomaték

R – szál (rúd) görbületi sugara

7. ábra

formában merev, de vékony szál formában könnyen hajlítható, alakítható).

A szálak szerkezetek előnyös tulajdonságait az ember korán felismerte, a belőlük készült termékeket évezredek óta használja. A véges hosszúságú (pamut-, gyapjú-, rost-) szálakból sodrással szilárdítva vastagabb lineáris terméket: fonalat, majd a fonalakból kelmét (szövet, kötött kelme) készítettek. A viszonylag vékony (makro-) szálakból, lineáris termékekből (fonalakból) készített lapszerű termékek a hajlékonyságot, alakíthatóságot megtartják, az emberi testre jól illeszthető, rugalmas, nagy szilárdságú, tartós, melegtartó „új bőr” (3D) készíthető.

A „szál” jellemzője az átmérőhöz képest nagyságrendekkel nagyobb hosszúság (l/d=100–10 000). A hagyományos makroméretű szálak átmérője 10–25 µm. A vékonyabb szálformát (d<sub>tex</sub><1, szálátmérő d<10–12 µm körüli) mikroszálként jelölik.

Az 1900-as évek kezdetétől a természetes szálak kiégésítésére egyre nagyobb mennyiségű és fajtájú mesterséges szálakat gyártanak. A mesterséges szálakat a sokrétű felhasználási igényeknek megfelelően, a fejlesztéseknek köszönhetően, egyre növekvő mennyiségben állítják elő.

A szálak, a szálak szerkezetek jellemzői széles tartományt ölelnek fel:

- nagyszámú, különböző fajtájú és tulajdonságú anyagösszetétel,
- száljellemzők: hossz/átmérő viszonya, finomsága,
- szálak alakja, felületkezelése,
- a felhasználási igényekhez igazított száltulajdonságok (pl. szilárdság/nyúlás),
- hibrid szál-, fonal- és kelmestruktúrák,
- a szál-, fonal- és kelmestruktúrák elrendeződése, alakja, görbülete.

A makro tartományban használt jellemzőbb szálak erő-nyúlás diagramját a 8. ábra mutatja.

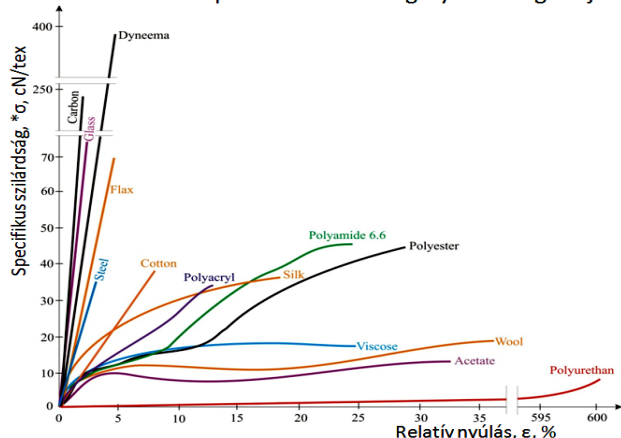
A szálak műszaki, kompozit célú használata esetén nagy szilárdságra, nagy húzási merevségre, a kelmében az egyenes szálhelyzetű elrendezésre törekednek.

### A szénatom és a szénvegyületek jellemzői

A **szénatom** (C) több szempontból is figyelemre-méltó, a Föld negyedik leggyakoribb alkotóeleme (O, S,

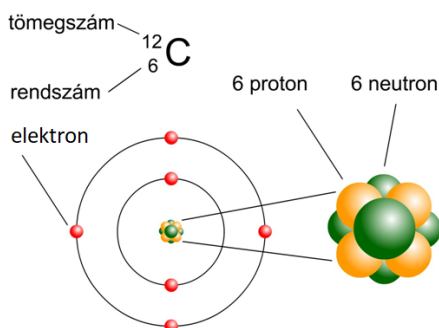


Különböző szálak specifikus szilárdság-nyúlás diagramja



8. ábra

### Szénatom szerkezete



9. ábra

Al, C). A szénatom nagyszámú, bonyolult változatú és összetételű vegyületek kialakulására képes, 2 milliónál is több különböző szénvegyület ismert (9. ábra).

A szénatom-mag körül összesen 6 elektron kering; 2 a belső, 4 a külső héjban. A szénatomokban a 4 külső héjban levő elektron sokféle kémiai kötésre képes. A szénatom kis mérete és viszonylag nagy elektron negatívítása képessé teszi önmagával vagy más atomokkal, molekulákkal kötések kialakítására.

A szénvegyületek a földi élet alapjául szolgálnak, ún. **szerves vegyületek**. (A szerves vegyületek felépítésében elsősorban a szén és a hidrogén a meghatározó, számos esetben az oxigén és nitrogén is megtalálható.) A szálak jelentős része is a szerves vegyületek csoportjába

### Szénatom kapcsolódási lehetőségei

A szénatomhoz kapcsolódó atomok száma	4	3	2
A kapcsolódó atomok térbeli elhelyezkedése			
Előfordulás	Gyémánt	Grafít sík	Láncmolekula
	Tetraédres (térbeli)	Trigonális (sík)	Digonális (lineáris)
A σ-kötést létesítő elektronok száma	4	3	2
A hibridállapot jele	sp <sup>3</sup>	sp <sup>2</sup>	sp
π-kötésre képes p-elektronok száma	0	1	2

10. ábra

sorolható, a szénszál kiinduló anyaga (PAN) is szerves vegyület, de a gyártás során a hidrogén és a nitrogén nagy részének eltávolításával (C≈95%) a szénszál a szerves anyagok csoportjába sorolják.

A négy vegyértékű szénatomok kapcsolódási lehetőségeit a 10. ábra szemlélteti.

A szénatomok korábban ismert két alapvető, de lényeges különböző tulajdonságú (allotrop) változatát, a legpuhább grafítot és legkeményebb gyémántot ismerték. Az utóbbi évtizedekben a szénatomok újabb változatait (fullerének, nanocsövek, grafén) fedezték fel.

A **gyémánt** szerkezetében a szénatomok térbeli elrendezésűen kötődnek, ez a legkeményebb és legnagyobb sűrűségű ismert anyag.

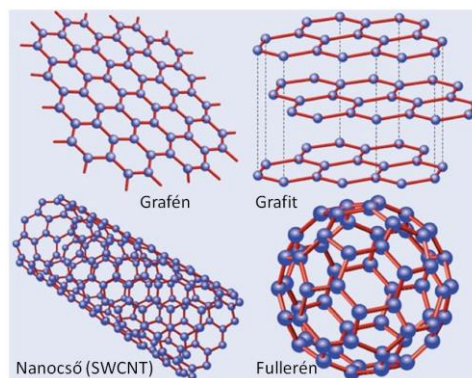
A **grafít** nagyszámú grafén (hatszögletű szénrács atomsík) oldalirányban van der Waals-kötéssel kapcsolódik. A grafít struktúrák a szénszál és a grafítszál szerkezetében is meghatározók.

A **grafén** hatszög (méhsejt) alakú egy szénrácsos atomsík.

Számos szilárd anyagban, a legtöbb fémekben található az ún. kristályrács: a nagyszámú kristályos atom rendezett, ismétlődő, háromdimenziós szerkezetet az atomok közötti kötések tartják össze. A gyémánt és a grafít szerkezete egyaránt 3D, de az atomok szerkezete alapvetően eltérő. A gyémántban az atomok szorosan háromdimenziós tetraéder elrendezésben kötődnek, míg a grafítban a szénatom síkok a kétdimenziós rétegekben szorosan kötődnek, a rétegek közötti oldalirányú kötések gyengék.

A szénatomok **trigonális méhsejt** kapcsolódási for-

### Szénatom méhsejt alakzatai



11. ábra

maít a 11. ábra szemlélteti.

A **szén nanocsövek** (CNT – Carbon NanoTubes) egyfalúak (SW – Single Wall) vagy sokfalúak (Multi-Walled) lehetnek, ezeket 1991-ben fedezték fel.

A **fullerének** 1985-ben felfedezett háromdimenziós szénatom-alakzatok, amelyek 60 szénatomból kialakított futball-labda elrendezésű zárt molekulájú ketrecek.

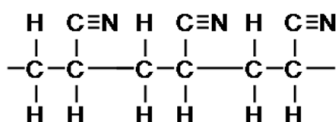
A **szénatomok láncszerű, lineáris** kapcsolódása a szerves mesterséges szalanyagok jellemzője, az oldalirányban kapcsolódó különböző atomok, molekulák sokféle különböző tulajdonságú szálát eredményez. Például a poliakrilnitril (PAN, prekursor) láncmolekula szerkezetét a 12. ábra szemlélteti.

Az **aromás, hatszögletű lineáris molekulaszervezet** a nagyteljesítményű (nagy szilárdságú, nagy merevségű) szálak (p-aramid, PBO) jellemzője (13. ábra).

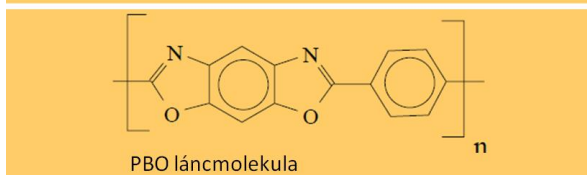
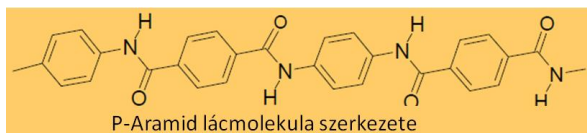
### A szénszál jellemzői

A szénszál gyártása során a kiinduló szerves PAN (PoliAkrilNitril, prekursor) szálát feszítve a hidrogént

Poliakrilnitril (PAN) láncmolekula



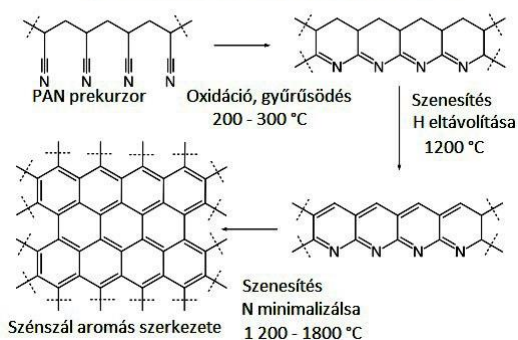
12. ábra



13. ábra

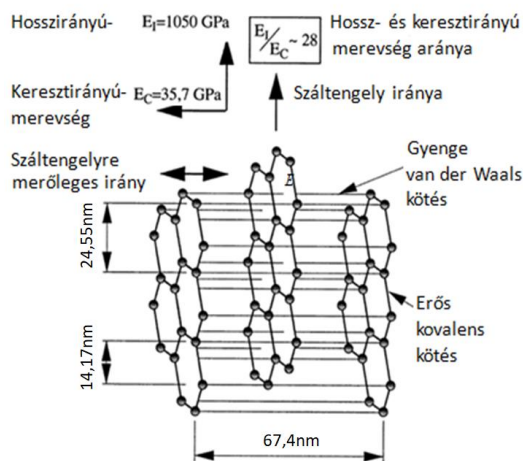
oxidációval, majd a szenesítés során semleges gázú kimenetben a nitrogén nagy részét is eltávolítják. Az így kialakuló vékony (5–7µm átmérőjű) mikroszálaban (0,4–0,7dtex) a láncmolekulák szénatom síkok (grafit kristály) a száltengely irányába rendeződnek. A hatszög alakú gyűrűs síkban elrendezett szénatomokat stabilis p elektronrendszer kapcsolja össze (14. ábra). A szénszál kristályos (grafit)

PAN prekursor molekula szerkezet változása az oxidáció és a szenesítés során



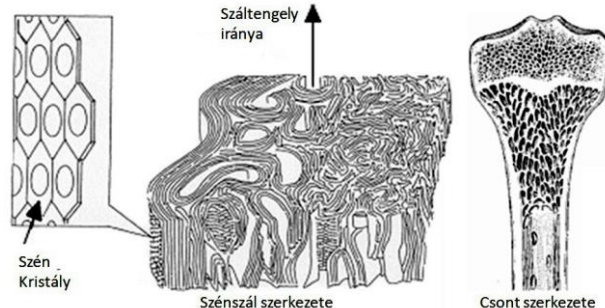
14. ábra

Szénszál molekula szerkezete



15. ábra

Szénszál és a csont szerkezete



16. ábra

szerkezetében a szénatomok elrendeződését a 15. ábra szemlélteti.

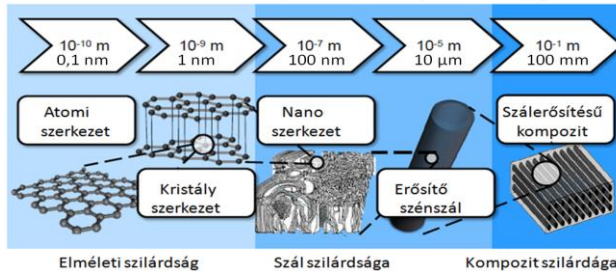
A szénszál gyártása során a száltengely irányú grafit-síkokat gyenge van der Waals-oldalkötések kapcsolják össze.

A szénszál elektronmikroszkópi felvételein (16. ábra) látható a csontszerű üreges szerkezet, ami a viszonylag kis sűrűség ellenére nagy merevségű és szilárdságú.

A szénszál nagy merevségű, törékeny, a szálmérő csökkentésével a hajlékonyság a feldolgozhatóság jelentősen javítható.

A szénszálat túlnyomó részben erősítőszálként, polimerekbe ágyazva, kimagasló tulajdonságú kompozitanyagként használják (17. ábra).

Szénszál szerkezeti felépítése, kompozitba ágyazása

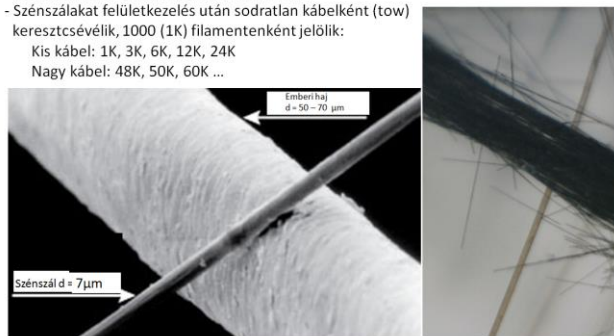


17. ábra

A szénszál főbb jellemzőit a 18. ábra foglalja össze.

Szénszál főbb jellemzői

- Szénszál vékony mikroszál (d= 5 - 7µm, ~0,4 - 0,7dtex)
- Szénatom tartalma (>0,95%)
- Szénszálat nagyrészt kompozit erősítésre használják: CFRP- Carbon Fiber Reinforced Polymers → szénszál erősítésű polimerek, C&C, C-SiC ...
- Szénszálakat felületkezelés után sodratlan kábelként (tow) keresztcsévélik, 1000 (1K) filamentenként jelölik: Kis kábel: 1K, 3K, 6K, 12K, 24K Nagy kábel: 48K, 50K, 60K ...



18. ábra

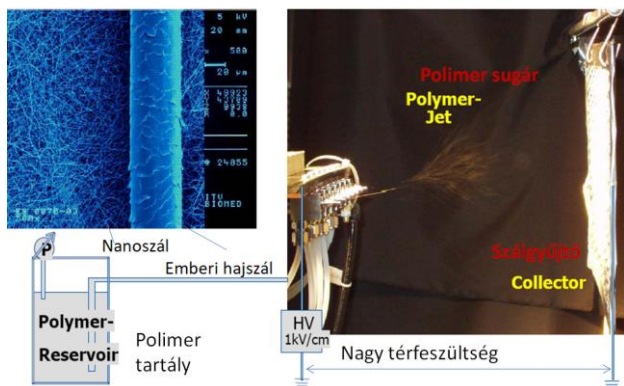
## Nanoszálak

A nanoszálak átmérője 100 nm alatti, a hossz/átmérő arányuk nagy. Például a szén-nanoszál (CNF -



Carbon Nano Fiber) akár 300  $\mu\text{m}$  hosszú is lehet. A nanoszálakat szénból, különböző fémekből, kerámiákból, polimerekből és természetes anyagokból, például cellulózból és kitinből (a rákfélék héját alkotó fehérje) is előállítják.

### Elektrosztatikus fonás



19. ábra

Az elektrosztatikus fonással gyártott nano-szén-szál szerkezete szabálytalanságoktól mentes, vékony, nagy szilárdságú (átmérője 10–100 nm, a hossz/átmérő arány 1000:1).

A nanoszálakat gyártására az elektrosztatikus fonás az elterjedt (19. ábra).

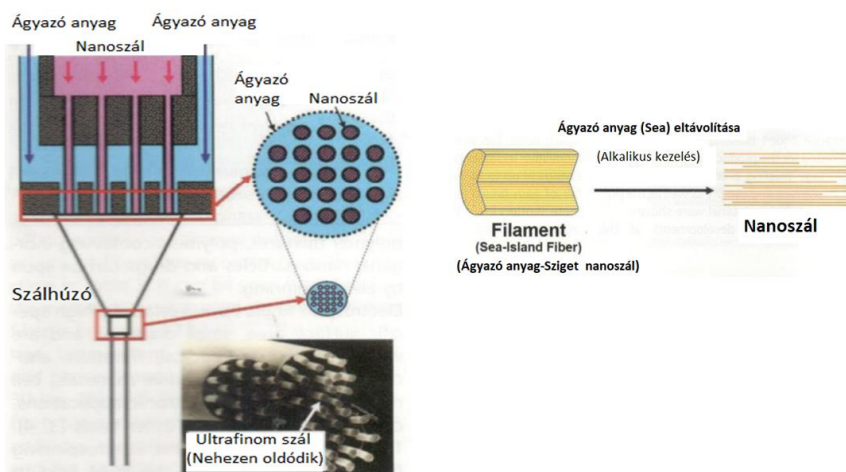
A Toray cég a nanoszálak előállítására új eljárást dolgozott ki. A nehezen oldódó nanoszálakat a könnyen oldható ágyazó anyagba foglalva („sea-island”, azaz „szigetek a tengerben”) bikomponens filamentet gyártanak, amelyből az ágyazó anyag (sea) leoldása után nagyszámú, vékony, különböző keresztmetszetű (kör, háromszög) nanoszál (island) készíthető (20. ábra).

Például a cellulóz olcsó nano szálakból készült könnyű kompozitokat ballisztikus páncélzat, űrhajók, autópárizsi karosszériák és repülőgépek belső terében használják.

A nanoszálakból készült nemszőtt szűrőanyagok kis pórusméretűek, az 1  $\mu\text{m}$  fölötti részecskék szűrését teszik lehetővé. Az akkumulátor anód pólusa szén nanoszálak porózus szerkezetű, nagy fajlagos felületű, vegyszerálló nemszőtt kelméből készíthető.

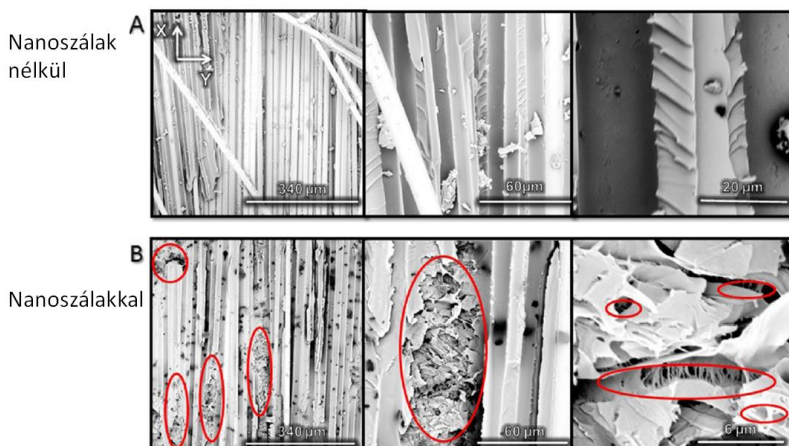
A mátrixba helyezett nanoszálak jelentősen javítják a mechanikai tulajdonságokat (21. ábra).

### Közegbe ágyazott nanoszál (Sea-Island) előállítási sémája



20. ábra

### A nanoszálak képesek áthidalni a repedéseket és elnyelni az energiát



21. ábra

### A grafén

A grafén egy szénatom vastagú, kétdimenziós hatszögletű rácsszerkezetű szénatom réteg. A szén-szál és a grafit is nagyobb részben grafén síkrácsokból épül fel (többek között ceruzahegy anyaga is grafit, a grafén síkok gyenge oldalkötéssel kapcsolódnak). Az 1 mm vastagú grafitban körülbelül 3 millió grafén réteg van.

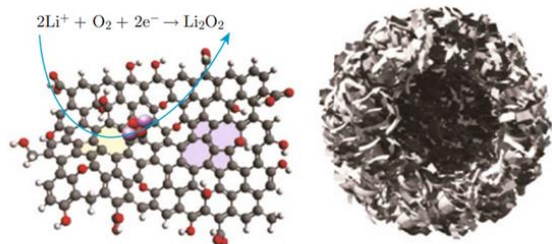
A grafént 2003–2004-ben fedezték fel, azóta a kutatások középpontjába került. A grafén kristályos szerkezetű, kétdimenziós, a grafén rétegek csak egy atomnyi vastagságúak (0,345 nm), a hatszögletű széngyűrűk méhsejt-szerűen illeszkednek.

A grafén egyik előnyös tulajdonsága, hogy nulla átfedésű félmetál (lyukakkal és elektronokkal egyaránt töltéshordozó), elektromos vezetőképessége kiváló. A grafén szénatom síkban (2D) a szénatomok három másik szénatomhoz kapcsolódnak, így szénatomonként 1 rendkívül mozgékony pi ( $\pi$ ) elektron szabadon elérhető, a grafénlap felett és alatt helyezkednek el. Ezek a pi pályák átfedik egymást, és hozzájárulnak a grafén szén-szén kötések erősítéséhez. Alapvetően a grafén elektronikus tulajdonságait a pi pályák kötése és kötésgátolása (a vegyérték és a vezetési sávok) határozzák meg.

A grafén szénatom rácscok vi-szonylag könnyen deformálódnak az atomrács szakadása nélkül. A grafént más anyagokba (pl. kompozitba) keverve szupererős szerkezetek készíthetők.

Az akkumulátorok kapacitásának további növelése a porózus elektrodák szerkezetének

### Funkcionális grafén-lemez sematikus felépítése



Ideális bimodális porózus szerkezet  $\text{Li}_2\text{O}_2$  akkumulátor működéséhez szükséges

22. ábra

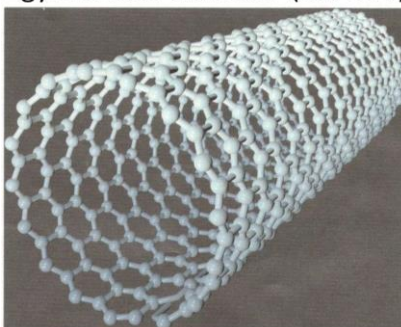
optimalizálásával lehetséges. A közelmúltban hierarchikusan porózus grafént vittek be lítium-levegő (Li-air) akkumulátorok elektród anyagaként. A lítium-levegő akkumulátorok a Li-alapú anódból és katódból állnak, amelyek folyamatosan kivonják az oxigént a környező levegőből. A mikro- és nano-porózus csatornák a gyors oxigén diffúziót teszik lehetővé és reaktív helyeket biztosíthat az  $\text{Li-O}_2$  reakciók számára. A hierarchikusan porózus funkcionális katód elektróda grafénlapok (FGSs – Functionalized Graphene Sheets) rácshibákat tartalmaznak (22. ábra).

A háromdimenziós (3D) porózus szerkezetű katód elektródákat a nagy töltési kapacitás elérésére fejlesztették ki.

### Szén-nanocsövek

Az **egyfalú szén-nanocsövek** (SWCNT – SingleWall Carbon NanoTube) a legújabb fejlesztések, rácsszerkezetük csirkeháló szerű (23. ábra). Fő jellemzőit az I. táblázat tartalmazza.

#### Egyfalú szén nanocső (SWCNT)



23. ábra

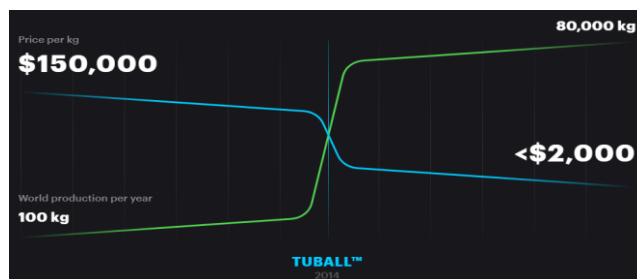
Az SWCNT bekeverése kompozitokba – a nagy felszín/térfogat (szén-szálhoz viszonyítva 1000-szeres) arány miatt a mátrixszal való jó kapcsolódásnak köszönhetően a mechanikai tulajdonságokat számottevően javítja, a rétegek elcsúszását (delamination) jelentősen csökkenti.

Alkalmazását korábban a kimagasló előnyös tulajdonságai ellenére a rendkívül magas ára és a kis volumenű gyártási kapacitás korlátozta. A grafén nanocsövek

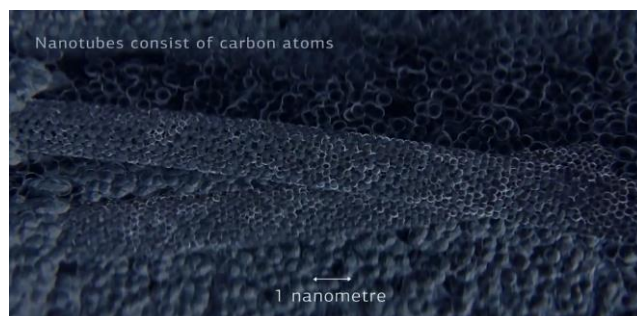
#### I. táblázat

#### Egy falú szén nanocső (SWCNT) kiváló tulajdonságai

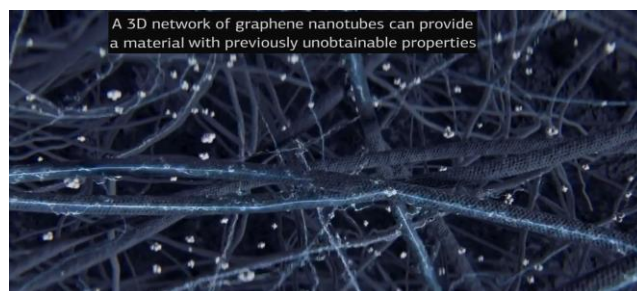
- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| • Szilárdság                | • 100 nagyobb az acélénál               |
| • Stabilitás                | • Hőállóság 1600°C-ig vákuumban         |
| • Hosszúság                 | • Hossz/átmérő (l/d) arány 3000 feletti |
| • Közömbös                  | • Vegyileg minden anyaggal kompatibilis |
| • Elektromos vezetőképesség | • 5 x nagyobb a réz vezetésénél         |



24. ábra



25. ábra



26. ábra

ipari méretű gyártása jelentősen csökkentette az árat, és számos ipar számára gazdaságos alkalmazás lehetőségét teremti meg (24. ábra).

Az egyfalú szén nanocső mikroszkópi képét a 25. ábra szemlélteti.

A SWCNF anyagokba ágyazásával a kis mérete miatt rendezetlen háromdimenziós irányú megerősítést biztosít (26. ábra).

Szén-nanocsőből kialakított „szivacs” (nemszőtt szerkezet) nagyon kis pórusú szerkezeti struktúrák kialakítását teszi lehetővé (27. ábra).

A szén-nanocső szivacs különböző méretben, vastagságban a kereskedelmi forgalomban is beszerezhető (II. táblázat).

A SWCNT alkalmazás számos területen kimagasló jelentőségű:

- Lítium-ion akkumulátor – 0,05% TUBALL™ a szilikon anód esetén az élettartam 4-szeresre növekszik,
- Üveg – 0,05% TUBALL™ megnöveli a szilárdságot és atoxikus hatásokat mérsékli,



27. ábra



II. táblázat

Szén nanocső szivacs ártáblázat

Product Name	Size (mm)	Thickness (mm)	Price (\$/piece)
TNHM11-1	10×10	1-2	30
TNHM51-1	50×10	1-2	185
TNHM22-1	20×20	1-2	155
TNHM52-1	50×20	1-2	430
TNHM11-3	10×10	3-4	50
TNHM51-3	50×10	3-4	280
TNHM22-3	20×20	3-4	215
TNHM52-3	50×20	3-4	615

• Akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) műanyag – 0,03% TUBALL™ megnöveli az ütésállóságot, antisztatikus,

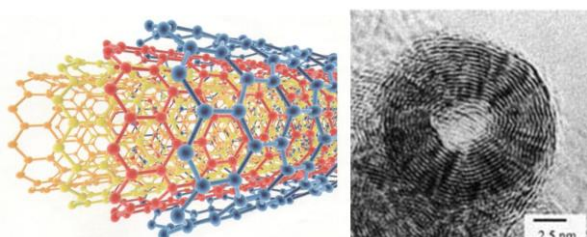
• Textília – 0,06% TUBALL™ állandó antisztatikus tulajdonságot garantál,

• Abroncs gumi – 0,1% TUBALL™ javítja a tapadást és a tartósságot.

A **többfalú szén-nanocsövek** (MWCNT – Multi-Walled Carbon NanoTube) felépítése: több különböző átmérőjű, egymásba helyezett szénrács cső (28. ábra). Előállításuk egyszerűbb, olcsóbb az SWCNT-nél, de tulajdonságai, alkalmazásával elérhető eredmények is szerényebbek.

Több falú szén nanocső

MultiWall Carbon NanoTube (MWCNT)



III. táblázat

Szál	Mechanikai tulajdonságok összehasonlítása			
	Modulus, E, GPa	Húzó szilárdság, $\sigma$ , MPa	Sűrűség, $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Átmérő/Vastagság
Grafén	~1 000	~100 000 – 400 000	1,8 – 2,2	0,345nm
SWCNT*/ MWCNT**	~1 000	~100 000 – 200 000	~0,7 – 1,7	1 ~20nm
Nano szénszál	~500	3 000 – 7 000	1,8 – 2,1	20 – 200nm
Szénszál	230 – 600	3 000 – 7 000	1,8	7 $\mu$ m
Aramid szál	60	3 600	1,44	5 – 10 $\mu$ m
Üvegszál	22	3 400	2,6	7 – 20 $\mu$ m
Poliészter szál HT***	14	1 100	1,38	10 – 20 $\mu$ m
Poliamid szál HT***	6	900	1,14	10 – 20 $\mu$ m
Acél szál	210	4 000	7,8	10 – 20 $\mu$ m

SWCNT\* – Single Wall Carbon NanoTube → Egy Falú Szén NanoCső

MWCNT\*\* – MultiWall Carbon NanoTube → Több Falú Szén NanoCső

HT\*\*\* – High Tenacity → Nagy szilárdság

IV. táblázat

	Gyártási kapacitás t/év	
	2009	2015
MWCNT	2 380	10 000
SWCNT	10	30
CNF	120	550
Grafén	<10	250

## Összefoglalás

A szén nanoanyagok tulajdonságait a III. táblázat foglalja össze.

A jövőben a gyártott mennyiségek gyors ütemű növekedésével, árak drasztikus csökkentésével és széleskörű alkalmazásukkal számos területen átütő eredmények várhatók (IV. táblázat).

A 20. század második fele a szerkezeti anyagok területén a műanyagok, a kompozitok kora volt. Úgy tűnik, a 21. század az egy atomnyi vastagságú méhsejt szénlemez, a grafén, az egyfalú nanocsövek kora lesz. A tudományos folyóiratokban kifogytak a szuperlatívuszok ezekről a különleges anyagról: a legkönnyebb, a legerősebb, a legvékonyabb, a legjobb hő- és elektromos vezető képességű stb. Várhatóan számos alkalmazási terület forradalmasítanak, a számítástechnikától kezdve a kompozitokon, autógumikon és a napelemeken, akkumulátorokon át a 3D nyomtatásig.

## Felhasznált irodalom

Biró László Péter: Grafén: új trónkövetelő a szén-nanoszerkezetek világában. Origo 2011

L. Pilato: CNTs ride a rising tide of nanotech optimism. CW 2010. 01. 28.

Manifesto of the Carbon Century. OCSiA 2010.

C. Shiara: Using single-wall carbon nanotubes to enhance materials. JEC World March. 2017.

P. Russo, A. Hu, G. Compagnini: Synthesis, Properties and Potential Applications of Porous Graphene: A Review Nano-Micro Letters 2013.

Molnár K.: Elektro-szálképzéssel előállított nanoszálak kompozitipari alkalmazásai. Magyar Textiltechnika 2011/1. p. 1-7.

Hirofumi Y., Masato M., Yoshitaka A.: Advanced nanofibers arising from pursuit of advanced melt-spinning technology. Man-Made Fiber Year Book, 2018 p. 66-68.

K. Dreschler: CFK – Technologie im Automobilbau – Was man von anderen Marken lernen kann? C.C.e.V. Automotive Symposium, Neckarsulm, 2010.

Steinmann: Carbon fibers: an overview on manufacturing, research and market ITA/RWTH Aachen University Mitteilungen 2015.

Szabó L., Szabó R.: Nagyteljesítményű kompozit-erősítő szálak, textil szerkezetek, szénszálak. ENELKO 2015. XVI. Nemzetközi Energetikai-Elektrotechnikai Konferencia. Erdélyi Magyar Műszaki Társaság. Arad, 2015. október 8-11. p. 136-141.