

Öntött poliamid 6 mátrixú nanokompozit fejlesztése

Andó Mátyás¹, Kalácska Gábor¹, Czigány Tibor²,

¹ SZIE-GÉK, Gépipari Technológiai Intézet (GÉTI), 2100 Gödöllő, Páter K. út 1, tel: 06-28-522-949

² BME-GEK, Polimertechnika Tanszék (PT), 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3, tel: 06-1-463-2003

Absztrakt

A szén nanocsövek adalékanyagként való használatának legfőbb akadálya, hogy az alapmátrixal való kapcsolatát sok tényező befolyásolja. Magnézium katalizálású öntött poliamid 6 (PA6) alapmátrixba kevertünk 1% alatti különböző előkezelésű szén nanocsövet, és vizsgáltuk a mechanikai és elektromos tulajdonságokat. Előzetes kísérletek alapján azt feltételezzük, hogy a grafit tartalom segíti a szén nanocsövek eloszlását, és 1% körüli érték az optimális az elektromos tulajdonságok szempontjából. A kutatást a GVOP 3.3. és az OTKA NI 62729 támogatta.

1. Bevezetés

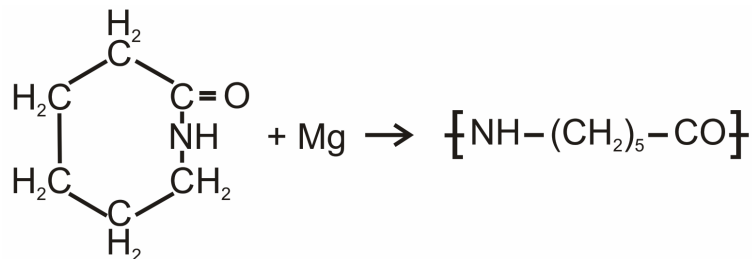
Számtalan kutatás foglalkozik kompozitok előállításával. Arányaiban a szén nanocsöves kompozitokkal többen foglalkoznak, mert a szén nanocsöveknek kiváló tulajdonságaik vannak. Ez a kutatási terület azonban igen tág, mert a nanokompozitok tulajdonságát jelentősen befolyásolják a peremfeltételek (szén nanocső fajtája, alapmátrix fajtája, gyártástechnológiák...). A sok peremfeltétel miatt egyelőre egyes eredmények csak nehezen általánosíthatóak, és általában a legtöbb problémát a szén nanocsövek eloszlása jelenti az alapanyagban. Az alapkutatások mellett megjelennek az alkalmazásokhoz közelebbi kutatások, melyeknél már a gazdasági szempont is komoly tényező. A jelenleg folyó kutatás célja egyik célja, hogy piacképes antisztatikus PA6 nanokompozitot állítsunk elő, úgy hogy a mechanikai tulajdonságok ne változzanak meg annyira, hogy az általános használhatóságot gátolnák.

2. Magnézium katalizálású öntött PA6, mint alapanyag

Az anyagfejlesztési folyamat egyik alapvető kérdése, hogy mi legyen az az alapmátrix, amelyből később kompozitot állítunk elő. A PA6 olyan műszaki műanyag, melynek igen jó mechanikai és tribológiai tulajdonságaik vannak, és már elterjedten használják a műszaki élet több területén is. Az anyagfejlesztési folyamatot jelentősen megkönnyíti, ha ipari partnerek is részt vesznek benne. Ezért a választott kompozit alapanyag a magnézium katalizálású öntött PA6. Ezt az anyagot a Quattroplast Kft. gyártja DOCAMID 6G-H néven.

A termék alapanyaga kaprolaktám ($C_6H_{11}NO$), mely kereskedelmi forgalomban kapható. Németországban 1938 körül készítettek először kaprolaktámból PA6-ot. Ez polikondenzációs folyamatot jelent, mely során víz keletkezik melléktermékként (Kalácska 2007). Nátrium katalizálású PA6-ot csak később állítottak elő, ráadásul nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket, mert szálgyártásra alkalmatlan volt. De annak ellenére, hogy alkalmatlan a szálgyártásra, azonban öntött tömbök gyártására kiválóan alkalmas (Macskási 1996). A magnézium katalizátor használata a szálgyártás problémáját nem oldotta meg, de módosít az öntött PA6 tömbök tulajdonságain. A Quattroplast Kft. világviszonylatban egyedülálló gyártástechnológiával magnézium katalizálású öntött PA6-ot állít elő ipari méretekben és volumenben, kihasználva azt az előnyt, hogy az ilyen jellegű katalizátoros eljárásoknál a gyűrűfelnylásos polimerizáció vízmentes közegben percek alatt végbemegy.

A folyamat lényege, hogy magnézium jelenlétében a kaprolaktám gyűrűk képesek felnyílni, így létrehozva a PA6 monomerjét. A folyamat során melléktermék nem keletkezik, tehát nem polikondenzációval alakulnak ki a láncok, hanem anionos gyűrűfelnyílasos polimerizációval. A PA6 előállításának elve a 1. ábrán látható.



Kaprolaktám + magnézium → PA6 monomer

1. ábra. Kaprolaktám gyűrűjének felnyílása

Alapmátrix gyártástechnológiája

A gyártási folyamat két fő részre osztható, az egyik az alapanyag előkészítésének műveletei, a másik pedig a polimerizáció folyamata.

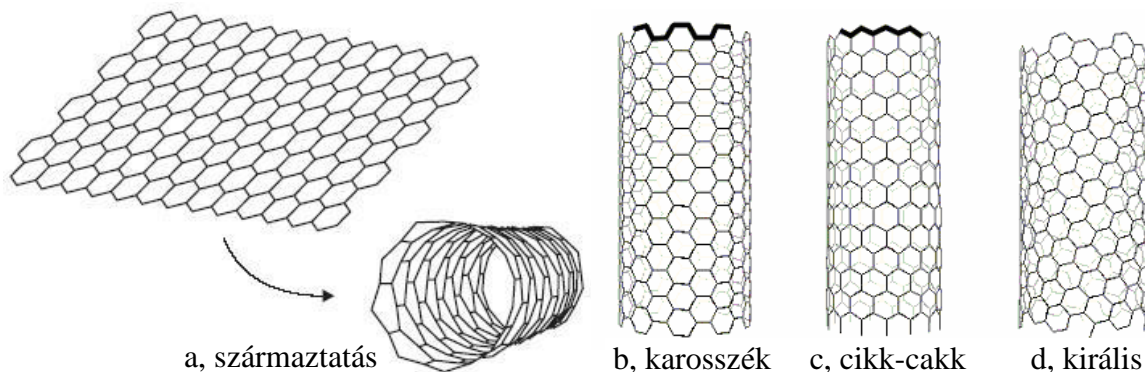
Az alapanyag előkészítése kaprolaktám megolvasztásával kezdődik, majd az olvadékot két egyenlő részben két reaktorba szivattyúzzák. A következő lépésben eltávolítják az esetlegesen abszorbeált vizet. A katalizátor oldat elkészítése a fő gyártási folyamattól függetlenül történik. A korábban elkészített magnézium tartalmú katalizátor koncentrátumot az egyik reaktorban a kaprolaktámhoz keverik. Az aktivátor oldat elkészítését a másik reaktorban lévő olvadt kaprolaktámból végzik. Ebbe a reaktorba kerülhetnek bele az aktivátor adalékanyagokon kívül az egyéb tulajdonságmódosító adalékanyagok is (például a szén nanocsövek).

Az öntéshez különböző méretű öntőmintákat használnak. Az előkészített két fajta keveréket 1:1 arányban az előmelegített öntőformába szivattyúzzák, majd a kemencében tartott öntőformában lejátszódik a polimerizáció, amely az adalékoktól és méretektől függően 2-30 percet jelent. Ennek a gyártástechnológiának köszönhetően azonos tulajdonságú öntvények készülhetnek eltérő tulajdonságú és minőségű alapanyagból. A nátrium katalizálású rendszerhez képest ezzel a módszerrel nagyobb szívósságot lehet elérni, illetve az ütésállóságot tág határok között lehet változtatni. Nagyméretű öntvény és finomabb (kis falvastagságú) termékek is önthetőek ezzel az eljárással. A termékek előállítása során biztosítható a magas átlagos alapanyag-kihozatal, ami legalább 95%-ot jelent.

3. Szén nanocsövek, nanokompozitok

A XX. század második felére jellemző volt, hogy egyre kisebb dolgok vizsgálata vált lehetővé. Ennek is köszönhetően 1991-ben felfedezték a szén nanocsöveket. Felfedezésüket követően igen hamar a tudományos élet középpontjába kerültek, hiszen rendkívüli tulajdonságokat mutattak. A kutatások elején az előállítás problémáját kellett megoldani, ami részben mára már sikerült is. Bár az ára még igen magas, de már beszerezhető olyan mennyiségben és minőségben, hogy erősítőanyagként lehessen használni különböző anyagfejlesztéseknél.

A szén nanocsövek szerkezete igen jellegzetes, gyakorlatilag egy tökéletes hengerré tekert, egyetlen atomvastagságú grafitréteg. A 2./a ábrán az egyfalú szén nanocső származtatása látható.



2. ábra. Egyfalú szén nanocső származtatása és fajtái

A gyakorlatban sokszor ezek a hengerek egymásba ágyazódnak így alakítva ki a többfalú szén nanocsöveket. A nanocsöveknek feltekeredésüktől függően három fajtájuk van (karosszék, cikkcakk, királis; 2. b, c, d ábra), és ettől a feltekeredésüktől függően az elektromos tulajdonságaik is változók. A rács hibáktól függően a szén nanocsövek elágazhatnak, elhajolhatnak (Dunlap-könyök) vagy spirált alkothatnak. A kutatások egyik irányvonala ezekkel az alakzatokkal foglalkozik, céljuk, hogy ezeket a geometriai módosulásokat pontosan szabályozni tudják.

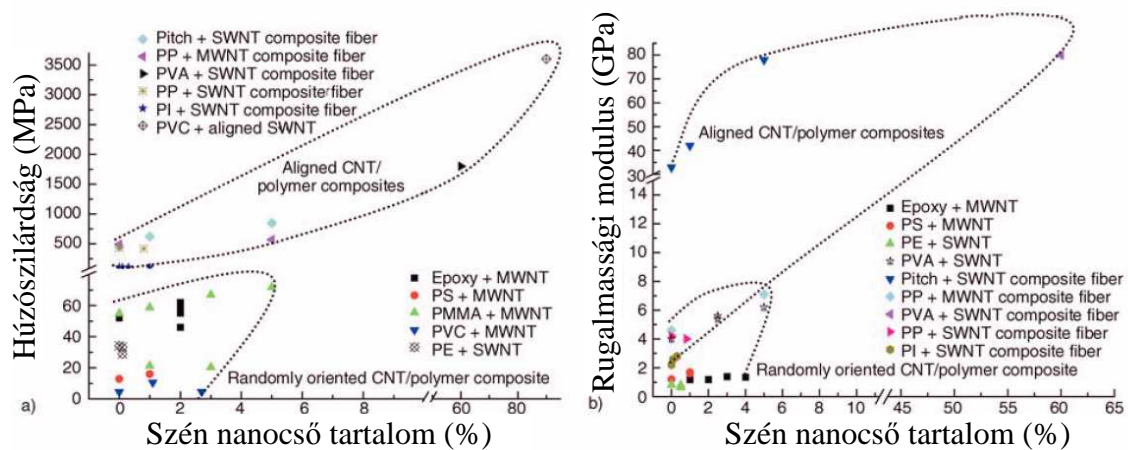
3.1. Mechanikai tulajdonságok

Az anyagfejlesztéseknél a szén nanocsöveket azonban más tulajdonságaik miatt használják. A korai szimulációk alapján kimutatták, hogy ennek a szén módosulatnak igen jó mechanikai tulajdonságai vannak. Például a rugalmassági (Young) modulusa elérheti az 1-2 TPa-t, szakítószilárdsága pedig a 200 GPa-t (Lu 1997, Wong 1997), bár Cadek 2004-ben már „csak” 1 TPa-t és 60 GPa-t említ. Yu munkatársaival a Washingtoni Egyetemen egyfalú szén nanocső kötegeket vizsgáltak és megállapításuk szerint a szén nanocsövek szakítószilárdsága 30-50 GPa (Yu 2000). Ezzel a méréssel bizonyították, hogy a szimulációkkal kapott eredmények megközelítik a valóságot, és így megállják a helyüket.

A mechanikai tulajdonságok mellett, kompozit képzési szempontból lényeges tulajdonság, hogy a szén nanocsövek igen nagy fajlagos felülettel rendelkeznek ($1000 \text{ m}^2/\text{g}$), ezért elvileg könnyebben kapcsolódhatnak az alpmátrixhoz. Azonban a hagyományosan használt szálakhoz képest igen rövidek, csupán néhány μm hosszúak. További probléma, hogy a szén nanocsöveknek nagy az aggregációs hajlama, így az alpmátrixban csoportokba ágyazódnak be, ennek hatására nem érvényesülnek kiváló tulajdonságaik ráadásul még feszültséggyűjtő helyeket is képeznek. Az előzőekből adódik, hogy az ilyen jellegű kompozitoknál elsődleges cél az, hogy csökkentjük az aggregációs hajlamot és elérjük a tökéletesebb diszpergálást. Továbbá olyan adhéziós kapcsolatot hozunk létre az alpmátrixszal, ami biztosítja a szén nanocsövek tulajdonságainak megjelenését a kompozit anyagban. Megfelelő körülmények között ennek hatására a kompozit húzószilárdsága 3600 MPa és rugalmassági modulusa 80 GPa is lehet (Du 2007). A diszperz rendszerek létrehozását a kémiai adalékokon kívül segíteni lehet mechanikus-, mágneses-, vagy ultrahangos keveréssel.

A közelmúltban sok olyan publikáció jelent meg, melyek a szén nanocsöves kompozitok mechanikai tulajdonságait kutatják. Általános eredményként elmondható, hogy más jellemzőkkel bírnak a random illetve az irányított szén nanocsöves kompozitok (irányított

elrendezés: kitüntetett irányba állnak a szén nanocsövek, ebben az irányban lényegesen nagyobb terhelést visel el a kompozit - anizotróp). A random eloszlátási rendszer eredményeként 100 MPa húzószilárdságnál és 6 GPa rugalmassági modulusnál többet elérni nem tudtak. Míg irányított nanokompozitoknál sikerült olyan vizsgálatokat is elvégezni, amikor a húzószilárdság elérte a 3600 MPa-t (Li 2000 – PVC alapon) vagy a rugalmassági modulus a 80 GPa-t (Dalton 2003 – PVA alapon). További lényeges tulajdonság, hogy a random típusú kompozitoknál a szén nanocsövek adalékolása csupán pár százalék lehet, mert nagyobb adalékolás esetén a mechanikai tulajdonságok annyira leromlanak, hogy a natúr mátrixét sem érik el. Irányított kompozitoknál ez a probléma nem jelentkezik, így ott az adalékolás az 50%-ot is meghaladhatja. A 3. ábra bemutatja a random és az irányított kompozitokkal elért mechanikai tulajdonságokat (random oriented CNT – random elrendezésű kompozit, aligned CNT – irányított elrendezésű kompozit, SWMNT- egyfalú szén nanocső, MWNT többfalú szén nanocső).



3. ábra. Mechanikai tulajdonságok szén nanocsővel adalékolt kompozitok esetén

Bai és társai (2003) többfalú szén nanocsövet keverték epoxigyantába és vizsgálták a mechanikai és elektromos tulajdonságaikat. Megállapításuk szerint a kritikus szén nanocső tartalom 0,5 %, mert felette a mechanikai tulajdonságok romlanak. A kritikus tartalom adalékolása felett a nanocsövek növelik az alapmátrix viszkozitását, és ezzel megnehezítik az eloszlátási törekvéseket.

A szén nanocső adalékolásának növelése együtt jár a nyúlás folyamatos csökkenésével függetlenül attól, hogy random vagy irányított kompozitról van-e szó, de a nyúlás nagyságrendje erősen függ az alapmátrixtól (Du 2007). Poliamid 12 esetében a nyúlás értéke 10 %-os szén nanocső adalékolás eredményeként körülbelül a felére esett vissza (nagyságrendileg 200%-ra) (Sandler 2004).

A gyártástechnológiából adódó lehetőségeknek megfelelően, kutatási programunkban random nanokompozitot alakítunk ki. Így a szén nanocsövek adalékolását is alacsony értékre választottuk, vagyis esetünkben nem haladja meg az 0,1%-ot.

3.2. Elektromos tulajdonságok

Az antisztatikus műanyagok egyik fontos elektromos tulajdonsága a felületi ellenállás. A meghatározás menetét az IEC 60093 szabvány tartalmazza. A felületi ellenállás arányos a rákapcsolt 500 V (egyenáram) és az állandósult áram hányadosával. A felületi ellenállás mértékegysége az ohm, és az anyagokat a 1. táblázatba felsorolt csoportok egyikébe sorolhatjuk be ez alapján (Kalácska 2007).

Felületi ellenállás (Ω)	Csoport jellemzője
$<10^{-3}$	Fémek elektromos vezetési tartománya
10^{-2} - 10^0	Tiszta szén vezetési tartománya
10^1 - 10^2	Elektromos árnyékoló polimerek
10^3 - 10^5	Elektromosan vezető polimerek
10^6 - 10^9	Elektromos töltéseket folyamatosan elvezetik (kis ellenállás mellett, ESd)
10^{10} - 10^{12}	Antisztatikus tulajdonságú polimerek (nagy ellenállás mellett)
$>10^{13}$	Szigetelő polimerek

1. táblázat. Anyagok felületi ellenállás szerinti csoportosítása

Korábbi években számtalan próbálkozás irányult arra, hogy az egyéb szénszármazékok mellett a szén nanocsöveket is felhasználják elektromos tulajdonságot javító adalékanyagként. Szén nanocsöveknek kicsi az ellenállásuk, vagyis jól vezetnek az áramot, ezért számtalan esetben sikerült vezetőképes kompozitot kialakítani a szén nanocsövek adalékolásával. A kutatások jelenleg a minél kevesebb adalékanyag bekeverését kívánják elérni, úgy hogy az anyag vezetőképes maradjon. Ezért értékeléseknél megjelenhet a „percolation threshold” ami a vezetőképesítéshez szükséges minimális szén nanocsövek mennyiségét adja meg százalékban (Dong 2007). Eddig EP-nél érték el a legkisebb értéket, ahol 0,0025% szén nanocső elég volt a vezetőképesítés eléréséhez (Sandler 2003). Ebben az esetben EP mátrixhoz irányított többfalú szén nanocső lett adalékolva, random elrendezésben ez az érték egy nagyságrenddel nagyobb, de így is csak 0,0225%. Allaoui méréseiből az is kiderül, hogy EP esetében az 1%-os adalékolás esetén már 10^{-3} S/cm vezetési a kompozit. PA6-ot Meincke (2004) vizsgált ilyen szempont alapján, és megállapította, hogy 4-6 % körüli adalékolásnál érték el azt, hogy a kompozit vezetőképesé válnon. A kutatások alapján összességében megállapítható, hogy a részben kristályos polimerekhez nagyobb százalékban kell adagolni a szén nanocsöveket, de ezeknél az anyagoknál az adalékolás még mindig kevesebb, mint 10%. Hasonlóan a többi szénszármazékhoz, az antisztatikus tulajdonság eléréséhez még kevesebb szén nanocsövet kell alkalmazni. Ezekből az adatokból is látszik, hogy a kritikus adalékolást nem az elektromos tulajdonságok határozzák meg, hanem a mechanikai tulajdonságok. Bai (2003) vizsgálatánál, a 0,5 %-os kritikus szén nanocső adalékolás esetén az elektromos vezetőképesítés már biztosítható, amit a saját mérései is igazoltak. A szén nanocsövek kitűnő elektromos tulajdonságai miatt a Gabriel-Chemie vállalat már kifejlesztett maximum 30% szén nanocsövet-, vagy fulleréneket tartalmazó mesterkeveréket. Ezeknek előnyük, hogy az elektromos tulajdonságok pontos beállítása mellett nagy a hőállóságuk, és jól diszpergálható rendszert képeznek. A megfelelő mesterkeverékek poliamidokhoz is kaphatóak (Pásztor 2006).

3.3. Hőállóság, égésgátoltság

A szén nanocsőből előállított kompozitoknak is változhatnak az éghetőségi tulajdonságai. A szén nanocsövek hővezetési tényezője 6600 W/mK is lehet, ez az érték a legnagyobb a jelenleg ismert anyagok között (Du 2007). 5% szén nanocső adalékolás már 60%-os növekedést jelent a hővezetési tényező értékében EP esetén (Thostenson 2006). A hővezetés nagyságát a széntartalom mellett a kapcsoló anyagok lényegesen befolyásolják, általában jelentősen csökkentik, ez magyarázza azt, hogy a kompozit hővezetése lényegesen kisebb, mint ami a szén nanocsövek hővezetéséből adódna (Du 2007). Kashiwagi (2002) polipropilén (PP) alapmátrixba kevert többfalú szén nanocsövet, és megállapította, hogy jelentősen

csökkenti a hőfejlődést (HRR – heat release rate – hőfejlődés), és legalább olyan hatékony, mint a montmorillonit nanokompozitok.

4. Mechanikai tulajdonságok összehasonlíthatósága

A 2. táblázat tartalmazza a natúr (adalékolatlan) öntött PA 6 alapanyag mechanikai tulajdonságait, mint referencia értékeket az egyes kompozitok későbbi értékeléséhez.

Húzószilárdság	Szakadási nyúlás	Fajlagos ütőmunka (Charpy)
79 MPa	25,85%	4870 J/m ²

2. táblázat. Alapmátrix mechanikai tulajdonságai

A mechanikai tulajdonságok értékeléséhez fajlagos számokat képeztünk a mérési eredményekből, mely a következőt jelenti: a kísérleti minták mérési eredményeit osztottuk az alapminta megfelelő tulajdonságával. Ez azt jelenti például, hogy az adott minta húzószilárdságának értékét osztottuk a kompozit minta húzószilárdságának értékével. A képzett értékek a következők: fajlagos húzószilárdság, fajlagos szakadási nyúlás és fajlagos ütőmunka érték. A minták jellemző összetételét és mechanikai tulajdonságait a 3. táblázat tartalmazza.

Minták kódja	Szén nanocső tartalom (%)	Grafit tartalom (%)	Szén nanocső fajtája	Fajlagos húzószilárdság	Fajlagos szakadási nyúlás	Fajlagos ütőmunka	Felületi ellenállás (10 ⁹ Ω)
58	0,03%	-	A	78%	11%	103%	-
79	0,03%	1,00%	B	87%	47%	102%	-
91	0,05%	1,00%	C	75%	9%	83%	87,00
98	0,05%	1,00%	D	91%	12%	86%	0,07
105	0,05%	1,00%	D	118%	25%	102%	0,09
131	0,05%	1,00%	D	70%	9%	117%	0,7
116	0,05%	2,00%	D	95%	11%	92%	3,60

98, 105, minták más gyártási eljárással készültek

A különböző típusú szén nanocsövek az előkészítésükben különböznek

3. táblázat. Kísérleti minták jellemző tulajdonságai

5. A kísérleti minták értékelése, kiválasztása

A kompozitok mechanikai tulajdonságai közül a szakadási nyúlás értéke csökkent a leginkább. A kísérleti minták közül a legjobbnak is csak 47% volt a fajlagos szakadási nyúlása. A fajlagos szakadási nyúlás átlag értéke 18%, míg a fajlagos húzószilárdságnak 88%, a fajlagos ütőmunka értéknek pedig 98%. A különböző adalékolás hatására a húzószilárdság értéke mutatja a legnagyobb szórást, majd a szakadási nyúlás, legkevésbé pedig az ütőmunka értéke mutat szélsőséges eredményt.

A 91-es minta kizárható a további vizsgálatokból, hiszen mindegyik vizsgált mechanikai tulajdonsága csökkent, szakadási nyúlása pedig az egyik legkisebb volt. Ezen kívül antisztatikus tulajdonsága ugyan kialakult, de voltak olyan kompozitok (98, 105 minták) is, ahol a felületi ellenállás értéke három nagyságrenddel kisebb volt, vagyis sokkal jobbak elektronvezetés szempontjából.

A 98-ös és 105-ös minták fő különbsége az öntés során alkalmazott katalizátor összetétele. A mérési eredményekből kitűnik, hogy a 105-ös minta mechanikai tulajdonságai minden esetben jobbak voltak a 98-as mintához képest. Bár a felületi ellenállás mérésénél a 98-as minta bizonyult jobbnak, de a felületi ellenállásban ekkora különbség nem mondható

jelentősnek, hiszen az antisztatikus tulajdonságot a felületi ellenállás nagyságrendjével érdemes jellemezni. Mindkét minta esetében a $10^7 \Omega$ nagyságrendű felületi ellenállás antisztatikus tulajdonság szempontjából igen jónak mondható, valójában a szakirodalmi Esd (Electro Static dissipative) kategóriába sorolható inkább.

A D fajtájú minták közül a grafit tartalomnak egyértelmű hatása van az elektromos tulajdonságokra. Ismeretes, hogy a grafit is igen jól vezeti az áramot - ezért is gyakran használják fel adalékanyagként - azonban a mi mérési eredményeinkből az derül ki, hogy a 2%-os grafit tartalom esetén a felületi ellenállás két nagyságrenddel romlott az 1%-os adalékolású mintához képest. Ennek oka az lehet, hogy a több grafit tartalom a szén nanocsövek eloszlását megzavarja, vagyis más méretben más felülettel ágyazódik be. Összességében más fajta eloszlást biztosítanak a kompozitnak, melynek hatására a felületi ellenállás növekszik. A 116-os minta előállítási körülményei teljes mértékben megegyeznek a 105-ös mintáéval, kivéve a grafit tartalmat. A 3. táblázatban látható, hogy a 105-ös mintához képest a 116-os minta minden mért mechanikai tulajdonsága csökkent. Ezek az eredmények is erősítik az előző elképzelést. Az eltérő eloszlás és beágyazódás a mechanikai tulajdonságokra is hatással van, valószínűleg azért, mert a szén nanocsövek nem tudtak erős adhézióval az alapanyaghoz kapcsolódni. Fontos megjegyezni azonban, hogy a korábbi tapasztalatok alapján a grafit tartalom segíti a szén nanocsövek adalékolását az alapmátrixba.

A 131-es minta esetében azt tapasztaltuk, hogy a szakadási nyúlás egy nagyságrenddel csökkent, továbbá a húzószilárdság is 70%-ra esett vissza, ami összességében a tönkremenetelhez szükséges befektetett munkának a jelentős csökkenéséhez vezet. Az eddigi tapasztalatunkkal viszont szemben áll, hogy ezen két jellemző lényegi csökkenése mellett az ütőmunka lényeges - majdnem 20%-os - emelkedést mutat. Vagyis kvázi statikus vizsgálat során a tönkremenetelhez szükséges munka csökken, míg dinamikus vizsgálatnál növekszik a töréshez szükséges munka értéke. Antisztatikus (Esd) tulajdonsága jó, hiszen a felületi ellenállás értéke $10^8 \Omega$ nagyságrendbe esik.

Az 58-as mintával kapcsolatban elmondhatjuk, hogy ezt a típusú szén nanocsövet grafit adalékolása nélkül nem tekinthetjük használható mintának, hiszen az ütőmunka minimális növekedése mellett a másik két mechanikai tulajdonság jelentősen csökkent. Ennél a mintánál egyértelműen jobb a 79-es minta. Az „A” jelzésű szén nanocső típus 1%-os grafit adalékolásával azonban megállapítható lesz a továbbiakban, hogy érdemes-e foglalkozni ezzel az anyaggal.

A kiválasztott anyagok alapján (79, 105, 131) megállapítható, hogy az 1% grafit tartalomtól csak pár tizeddel érdemes eltérni, hiszen a nagyobb eltérésű minták különböző okok miatt kizárásra kerültek a fejlesztés irányvonalából.

Összefoglalás

A szén nanocsövek adalékanyagként való használata lehetséges magnézium katalizálású öntött PA6-ban, mert antisztatikus tulajdonságok eléréséhez 0,1% szén nanocső sem szükséges. Az optimális adagolás azonban még kérdéses. Mérések alapján összefoglalható, hogy a grafit tartalom egy százalék körüli értéke hozhat jó eredményeket. A minták értékelése alapján megállapítottuk, hogy a mechanikai tulajdonságok alapján három mintával (receptúrával) érdemes tovább foglalkozni. 79-es és 105-ös minták különböző összetételűek voltak, de mindkettő mintának vannak olyan előnyei, amiért érdemes a továbbiakban velük foglalkozni. A 79-es mintának csökkent a legkevesbé a nyúlása, míg a 105-ös mintának nőtt a legjobban a húzószilárdsága. A 131-es minta azért különleges, mert a korábbi tapasztalatunkkal ellentétben a kvázi statikus és dinamikus vizsgálatok eredményei a korábban tapasztaltakkal ellentétben van, vagyis a töréshez szükséges munka az egyes vizsgálatoknál ellentétes irányban változtak meg jelentősen.

Irodalom

Bai J. B., Allaoui A. (2003): Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties. *Composites: Part A*, 34 (8) 689-694.

Cadek M., Coleman J. N., Ryan K. P., Nicolosi V., Brister G., Fonseca A., Nagy J. B., Kostak K., Béguin F., Blau W. J. (2004): Reinforcement of polymers with carbon nanotubes: The role of nanotube surface area. *Nano Letters*, 4 (2) 353-356

Dalton A. B., Collins S., Munoz E., Razal J. M., Ebron V. H., Ferraris J. P., Coleman J. N., Kim B. G., Baughman R. H. (2003): Super-tough carbon nanotube fibers. *Nature* 423 703.

Dong W., Zhang X., Liu Y., Wang Q., Gui H., Gao J., Song Z., Lai J., Huang F., Qiao J. (2006): Flame retardant nanocomposites of polyamide 6/clay/silicone rubber with high toughness and good flowability. *Polymer*, 47 (18) 6874-6879

Du J. H., Bai J., Cheng H. M. (2007): The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites. *eXPRESS Polymer Letters*, 1 (5) 253-273

Kalácska G. (szerk.) (2007): Műszaki polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban. Gödöllő : 3C-Grafika Kft.

Kashiwagi T., Grulke E., Hilding J., Harris R., Awad W., Douglas J. F. (2002): Thermal degradation and flammability properties of poly(propylene)/carbon nanotube composites. *Macromolecular Rapid Communications*, 23 (13) 761-765

Li F., Cheng H. M., Bai S., Su G., Dresselhaus M. S. (2000): Tensile strength of single-walled carbon nanotubes directly measured from their macroscopic ropes. *Applied Physical Letters*, 77 3161-3163.

Lu J. P. (1997): Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes. *Physical Review Letters*, 79 (7) 1971-1975

Macskási L. (1996): Műanyagok előállításának kémiai és műveleti alapjai. Budapest: Abigél Bt.

Meincke O., Kaempfer D., Weickmann H., Friedrich C., Vathauer M., Warth H. (2004): Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene. *Polymer*, 45 (3) 739-748

Pásztor M., Orbán S. (2006): Fénystabilizálás, színezés, antisztatizálás, antibakteriális adalékok. *Műanyagipari Szemle*, 3 (2) 13-19

Sandler J. K. W., Kirk J. E., Kinloch I. A., Shaffer M. S. P., Windle A. H. (2003): Ultra-low electrical percolation threshold in carbon-nanotube-epoxy composites. *Polymer*, 44 (19) 5893-5899

Sandler J. K. W., Pegel S., Cadek M., Gojny F., van Es M., Lohmar J., Blau W. J., Schulte K., Windle A. H., Shaffer M. S. P. (2004): A comparative study of melt spun polyamide-12 fibres reinforced with carbon nanotubes and nanofibres. *Polymer*, 45 (6) 2001-2015

Thostenson E., Chou T-W. (2006): Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites. *Carbon*, 44 (14) 3022–3029

Yu M. F., Files B. S., Arepalli S., Rouff R. S. (2000): Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. *Physical Review Letters*, 84 (24) 5552-5555

Wong E. W., Sheehan P. E., Lieber C. M. (1997): Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science*, 277 (5334) 1971-1975