



# **ZÁRÓJELENTÉS**

**OTKA F67897**

Címe:

**Hibrid polimer nanokompozitok kifejlesztése**

Témavezető:

**Dr. Romhány Gábor**  
egyetemi adjunktus

Futamidő:

**2007. július – 2010. december**

Budapest, 2011. január

## 1. Bevezetés

A szén nanocső erősítésű kompozitok új anyagcsoportot szolgáltathatnak az anyagtudomány számára. A szén nanocsövek rendkívüli mechanikai, termikus és villamos tulajdonságaik mellett igen nagy fajlagos felülettel rendelkeznek, ami a nagy kapcsolódási határfelület révén ideális kompozit erősítőanyaggá teheti őket. Bár a kezdeti szakirodalmi eredmények rendkívüli várakozásokkal tekintettek egyedüli kompozit erősítőanyagként történő felhasználásukra is, rövidtávon teherviselő szerkezetekhez történő ipari hasznosításuk leginkább hibrid kompozitok erősítőanyagaként lehetséges. Ezekben ugyanis az igénybevételt a nagy szilárdságú erősítőszálak veszik fel továbbra is, ugyanakkor az erősítőrétegek közti mátrixanyagot a nanocső erősítheti tovább, és hozhat létre erősebb interlamináris kapcsolatot. Kutatásaink során elsősorban a nagy teljesítményű kompozitokban használt szénszál/epoxi rendszert vizsgáltuk, az epoxi mátrixot töltöttük szén nanocsövekkel hibrid erősítő struktúra létrehozása céljából. Emellett hőre lágyuló polimer, az in situ polimerizált CBT erősítését is vizsgáltuk szén nanocsővel.

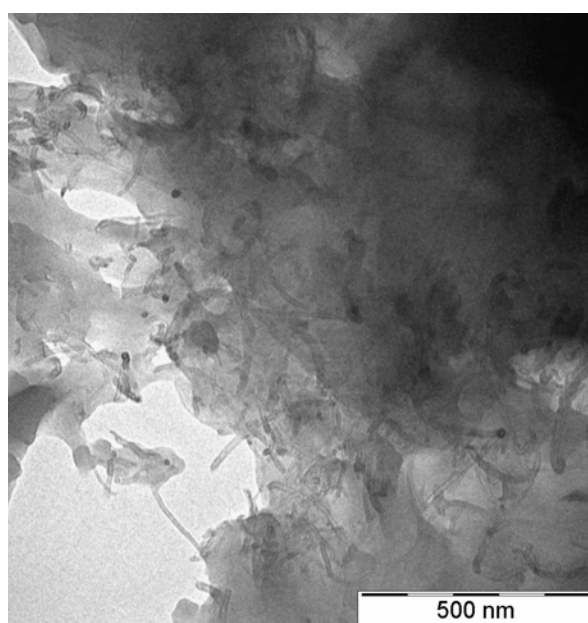
## 2. Kutatási eredmények

### 2.1. Szén nanocső eloszlása az epoxi mátrixban

A szén nanocsövek szerkezetükből és gyártástechnológiájukból adódóan aggregátum formában kerülnek forgalomba. Ez felhasználásukat jelentősen megnehezíti, hiszen ezekben a kb. 1-2 mm átmérőjű aggregátumokban a nanocsövek egymásba vannak hurkolódva, amely miatt a gyantában történő eloszlásuk rendkívül nehéz. A kutatás során első megoldandó feladatunk ezen aggregátumok hatékony felbontása, valamint a leválasztott nanocsövek mátrixban történő megfelelő eloszlása volt. Az eloszláshoz olyan keverési eljárást kellett kifejleszteni, ami megfelelő őrlő hatásával képes felbontani az aggregátumokat, és erős nyíró áramlást létrehozva képes róluk leválasztani a nanocsöveket, ugyanakkor a lehető legkevésbé törje össze azokat. A kezdeti irodalomkutatás alapján eloszlási eljárásnak a hengersizékes keverést választottuk. Hengersizékes keveréssel 0 és 2 tömeg% közötti nanocső tartalmú epoxi gyantát állítottunk elő, majd ezek felhasználásával kompozit és hibrid kompozit mintákat készítettünk mechanikai vizsgálatok számára. A keverési technológia ideális paramétereit részecskeméret mérésével és elektronmikroszkópos vizsgálatokkal határoztuk meg. A gyantákon viszkozitás vizsgálatot végeztünk, melyek a tapasztalati megfigyelésekkel egybehangzóan a viszkozitás jelentős növekedését mutatták. Már néhány tized százalék szén nanocső töltés is olyan mértékben

megnövelte a gyanta viszkozitását, hogy feldolgozása igen nehézkessé vált. Mechanikai vizsgálataink biztatóak voltak (többek között a hajlító és a rétegeközi nyíró tulajdonságokban kaptunk emelkedést a hibrid kompozitok esetén), azonban a feldolgozási problémák miatt új gyantarendszert és eloszlási eljárást kellett kifejlesztenünk [1-6].

Új gyantarendszernek extrém kis viszkozitású epoxi reaktív hígítót választottunk. Ez a kis viszkozitás biztosíthatta azt, hogy a nanocsővel töltött rendszer viszkozitása is a még iparilag (pl. vákuuminjektálással) feldolgozható tartományban maradjon. Problémaként jelentkezett, hogy az alapgyanta viszkozitása nem volt elég magas a közvetlen hengersizékes feldolgozáshoz, így új keverési technológiákat kellett kifejlesztenünk, alkalmaznunk. Két új keverési technológiát alkalmaztunk az új gyantarendszerre, a közvetlen belső keverős keverést és egy általunk fejlesztett mesterkeverékes eljárást. A közvetlen keverés során IKA Magic Lab berendezésen Dispax reaktorban oszlattuk el a nanocsöveket a gyantában. A mesterkeverékes eljárás során először egy nagy (8 tömeg%) nanocső tartalmú mesterkeveréket állítottunk elő száras keverővel, aminek a viszkozitása már megnőtt annyira, hogy át tudtuk jártni hengersizéken (a valódi diszpergálás csak ezen második lépés során zajlott le), majd pedig ezt használtuk visszahígítva a különböző töltésű gyanták alapanyagaként. Az elvégzett részecskeméret meghatározások, valamint az előállított gyanták felhasználásával készített kompozitok tulajdonságai alapján egyértelműen az általunk fejlesztett mesterkeverékes eljárás lett a hatékonyabb [9-10]. A mintákon transzmissziós elektronmikroszkópos vizsgálatokat is végeztünk (1. ábra), ami alátámasztotta a megfelelő diszperziót, a legnagyobb részecske is a néhány mikronos tartományba esett.



1. ábra TEM felvétel nanocsővel töltött epoxi nanokompozitból kimetszett mintáról

A készített nanocső töltésű gyanták ülepedését is vizsgáltuk mérőcsöves ülepedésméréssel, szintén jó eredményeket kaptunk, reaggregációt, gyors ülepedést nem tapasztaltunk. A kifejlesztett mesterkeverékes eljárás további előnye könnyű ipari méretekre történő felskálázhatósága is. A kifejlesztett mesterkeverék a különböző adalékanyagokhoz, pl. színező pasztákhoz hasonló egyszerű felhasználhatósága miatt gyorsan piacképes terméké tehető.

## 2.2. Szén nanocső/epoxi határfelületi kapcsolat javítás

Kompozit rendszerek fontos paramétere a szál és a mátrix közötti tapadás. Erősítő hatást addig semmilyen esetben sem várhatunk, míg a terhelésátadás nem megfelelő az erősítő szál és a mátrix között. Ennek a terhelésátadásnak a megoldására, segítségére szén nanocső erősítésű kompozitok esetén eddig a szakirodalomban szinte kizárólag a nanocsövek vegyi úton történő felületi funkcionálizálását alkalmazták, azonban ez a módszer csak laborméretben valósítható meg gazdaságosan, ráadásul rendkívül nagy mennyiségű környezetre ártalmas vegyszer felhasználásával jár. Emiatt új határfelületi kapcsolatot erősítő módszer kifejlesztését tűztük ki célul.

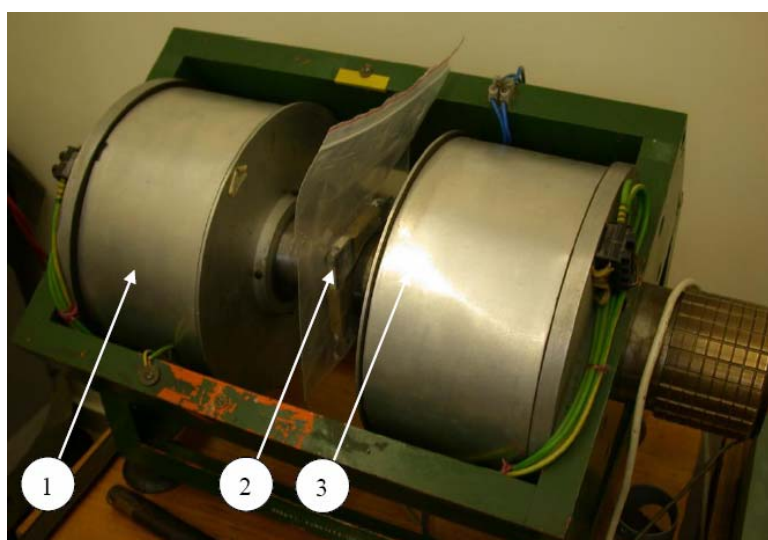
Új módszerként a szén nanocső erősítésű nanokompozitok és a szén nanocső/szén szál erősítésű hibrid kompozitok nagyenergiájú elektronbesugárzását választottuk. Első kísérleteink során tiszta epoxi/szén nanocső rendszert vizsgáltunk, ahol mind a hajlító szilárdságban, mind a rugalmassági modulusban, mind pedig a bemetszett útvonalon hajlító szilárdságban emelkedést tapasztaltunk a besugárzás hatására [8,12,14, 16]. Ez igazolni látszott azt a feltevésünket, hogy a nagyenergiájú elektronsugárzás javítani tudja a határfelületi adhéziót.

További kísérleteinkhez továbbfejlesztettük a rendszert, és aktív csatolóanyagként az elektronsugárzás hatására térhálósodó vinilésztert alkalmaztunk. A kísérletsorozat során 1, 5, 10, 30 és 50 tömeg%-ban kevertük az iniciátort nem tartalmazó vinilésztert az epoxi-nanocső rendszerhez. Az epoxit hagyományos módon térhálósítottuk, majd ezt követően a rendszerben jelen levő vinilésztert elektronsugárzással térhálósítottuk. Ezen hibrid gyantarendszer ily módon való térhálósítását mi végeztük elsőként. Első lépésként megvizsgáltuk a vinilészter térhálósodási folyamatát, melyhez Raman spektroszkópiás vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatok egyértelműen kimutatták, hogy már az alkalmazott 25, 50, 100 kGy sugárdózis legalacsonyabb értéke is elegendő volt a vinilészter térhálósításához. A készített 0,3 tömeg% szén nanocsővel töltött gyantarendszerekből mechanikai vizsgálatokhoz szálerősítéses

laminátokat készítettünk. A mechanikai vizsgálatok során kimutattuk a vinilészter jótékony hatását, mind hajlító, mind rétegeközi nyíró, mind pedig dinamikus rétegeközi nyíró tulajdonságokban javulást sikerült elérnünk a referencia anyaghoz képest (referenciaként két, iparilag is alkalmazott csatolóanyagot alkalmaztunk) [17]. Az általunk kifejlesztett csatolóanyag rendszer és gyártási eljárás nagy előnye könnyű ipari felhasználása (a hagyományos gyártástechnológiák továbbra is változtatás nélkül alkalmazhatók, plusz lépésként jelenik meg a kész alkatrész elektronbesugárzása), valamint környezetbarátsága (a vegyi funkcionálizáláshoz rendkívüli mennyiségű veszélyes anyag felhasználása szükséges, ami folyamatos kockázatot jelent).

### 2.3. Szén nanocső orientálása a mátrixban

A szálerősítéses kompozitok nagy előnye, hogy az alkatrész igénybevételeinek megfelelően tervezhetőek az anyagtulajdonságok a szálak megfelelő orientálásával. A szén nanocső erősítésű kompozitok esetén is lehetőség adódhat orientációra, azonban a kutatások egyelőre ezt csak mikroszkopikus méretben vizsgálták. Kutatásunk során erre a területre is kitértünk és vizsgáltuk a szén nanocsövek mind egyenáramú elektromos, mind mágneses térrel történő orientálását (2. ábra). A vizsgálatok során kompozit és hibridkompozit rendszereket állítottunk elő, térhálósításuk során különböző ideig különböző erősségű mágneses és elektromos térbe helyezve őket. A mintákról készített TEM felvételekről nem sikerült biztos következtetést levonnunk, azonban a minták mechanikai vizsgálata során biztató eredményeket kaptunk, melyeket a mintákon végzett hővezetésmérések eredményei is alátámasztottak [13]



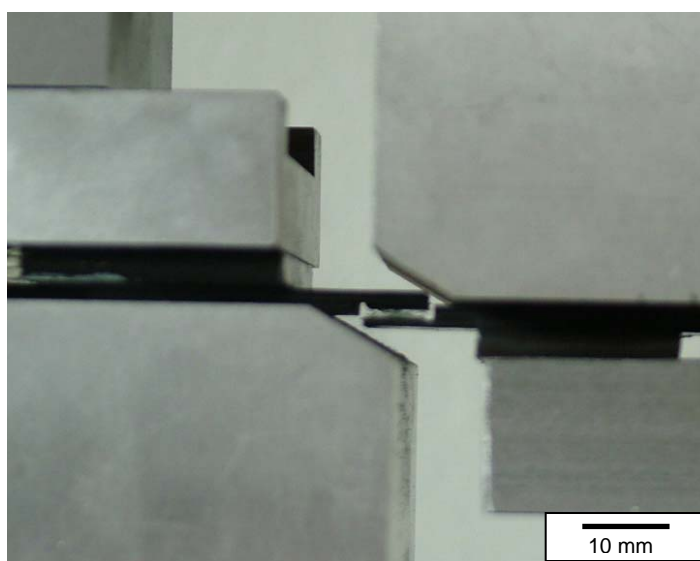
2. ábra Szén nanocsővel töltött epoxi térhálósítása mágneses térben (1) északi mágneses pólus, (2) szerszám, (3) déli mágneses pólus

## 2.4. Rétegek közötti statikus és dinamikus mechanikai vizsgálatok

Miután a megfelelő elosztási módszer rendelkezésünkre állt, a hangsúlyt a mechanikai vizsgálatokra, a hibrid kompozitok mechanikai viselkedésére tudtuk áthelyezni. A kezdeti előkísérletek (húzó, hajlító és rétegek közötti nyíró tulajdonságok meghatározása) alapján a hibrid erősítés jellemzően a rétegek közötti tulajdonságokban hozott komoly javulást, így ezen tulajdonságok meghatározására koncentráltunk.

Elsőként statikus rétegek közötti nyíró tulajdonságokat határoztunk meg. A mérési eredmények alapján 0,3 tömeg% szén nanocső töltés és 50% elektronsugárással térhálósított vinilészter hozzáadása több, mint 30%-os rétegek közötti nyíró szilárdság növekedést hozott a hagyományos kompozitokhoz képest.

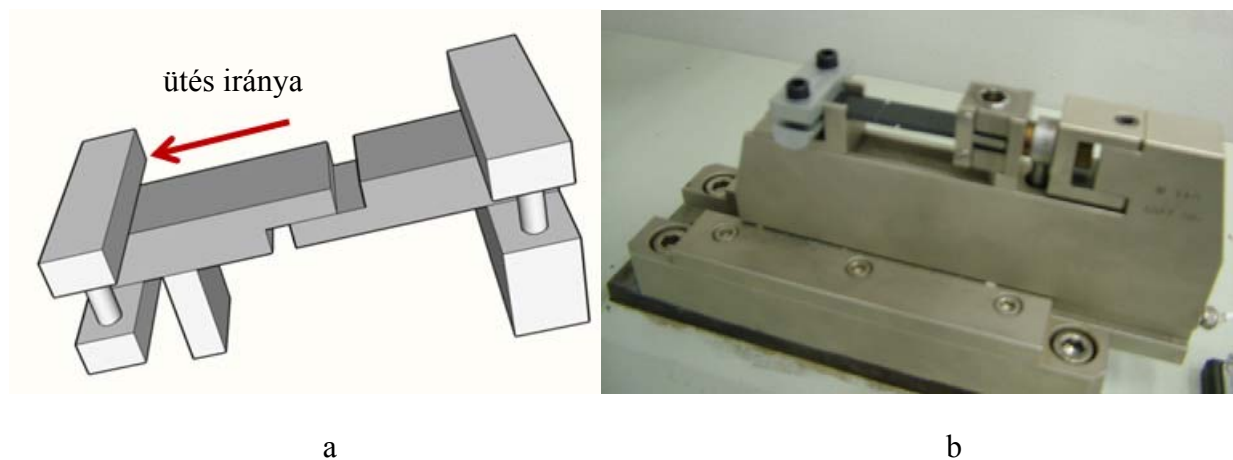
A kutatás során a Iosipescu-féle nyíróvizsgálatot módosítottuk, és ún. rétegek közötti szakító vizsgálatot fejlesztettünk ki (3. ábra). A vizsgálati eredmények szintén kimutatták a szén nanocső töltés előnyét, már 0,1 tömeg% szén nanocső töltésnél is közel 20%-os javulás volt tapasztalható.



3. ábra Rétegek közötti „szakító” vizsgálat

A dinamikus rétegek közötti tulajdonságok megismerésére, leírására dinamikus rétegek közötti nyíró vizsgálatot fejlesztettünk ki. A vizsgálat alapját az ütve szakító és a rétegek közötti nyíró vizsgálat adta. A mérés során egy rétegek közötti nyíró próbatestet ütve szakító kalapáccsal szakítottunk el nagy sebességgel (4. ábra). A vizsgálatok eredményei alapján 1 tömeg% szén nanocső töltés több, mint 33%-kal növelte a fajlagos rétegek közötti ütési energiát. A megszerzett vizsgálatok

alapján a javítás mechanizmusa szívósítás volt, a nanocső töltés hatására még ezen dinamikus terhelés során is jóval több idő telt el a terhelés ráadásától a tönkremenetelig.



4. ábra Dinamikus rétegekzi nyíróvizsgálat elve (a) és kivitelezése (b)

### 2.5. Rétegekzi statikus és fárasztó törésmechanikai vizsgálatok

A rétegekzi igénybevételek legveszélyesebb formája az I. módú rétegekzi nyitó igénybevétel. Ezen igénybevétellel szembeni ellenálló képesség vizsgálatára először statikus vizsgálatokat hajtottunk végre. A repedés terjedését a hagyományos vizuális megfigyelés mellett akusztikus emissziós szenzorok segítségével is követtük (5. ábra). Az akusztikus emissziós mérési módszer segítségével új, a fizikai folyamatokkal közvetlen kapcsolatban lévő (a szabvány csak empirikus módszereket ad meg) repedés megindulási kritériumot határoztunk meg. A mérések jó eredményekkel zárultak, a szén nanocsövek a repedés eltérítésével, pályájának meghosszabbításával 33%-kal növelte a fajlagos repedésterjedési ellenállást [7,11,18,21].



5. ábra I. módú rétegekzi törésmechanikai vizsgálat

Fárasztó rétegek közötti törésmechanikai vizsgálatokat is végzünk a fejlesztett anyagokon. A vizsgálatokat egy Instron 8872 típusú szervó-hidraulikus fárasztó gépen végeztük (a húzó fárasztó vizsgálatokhoz hasonlóan), melynek méréshatára 25 kN volt. A berendezés nem volt alkalmas ezzel az erőmérő cellával sem DCB (I. módú), sem ENF (II. módú) elrendezésben a megfelelő vezérlésre, így vizsgálatra. A vizsgálatokkal ezek után egy Zwick Z005 típusú elektromos hajtású golyósorsós berendezésen próbálkoztunk, azonban ez sem hozott sikert. Új 1 kN méréshatárú erőmérő cella beszerzése után a fárasztógép alkalmassá vált a mérések elvégzésére. Az összehasonlító vizsgálatot a statikus eredmények alapján legjobbnak ítélte 0,3 tömeg% szén nanocsővel töltött mintán végeztük el a referencia anyag mellett, DCB elrendezésben. A fejlesztett AE repedéskövetési eljárást sikeresen ültettük át a ciklikus vizsgálatra. Az eredmények rendkívül jók lettek, a hibrid kompozit törésmunka ciklusszáma közel 4-szerese lett a hagyományos kompoziténak, a repedésterjedési sebesség pedig a teljes törési folyamatban minimum 70%-kal csökkent. A rétegek közötti fárasztás vizsgálatból egy TDK dolgozat született (I. hely [22]), a vizsgálati eredményekről előkészületben van egy angol nyelvű publikáció, amelynek benyújtása 2011 februárjában várható.

## 2.6. Hőre lágyuló mátrixú, szén nanocső töltésű nanokompozit kifejlesztése

A nagy teherbírású, végtelen szálerősítésű polimer kompozitok hagyományos mátrix anyaga a hőre keményedő polimerek. Hőre lágyuló polimerek használata mátrixanyagként csak korlátozott, köszönhetően ezen anyagok nagy ömledékvizkozitásuk okozta rossz impregnáló képességüknek. Mivel azonban a hőre keményedő mátrixok meglehetősen ridegek, utólagos alakadás nem lehetséges, továbbá az újrahasznosítási lehetőségek is korlátozottak, ezért egyre nagyobb az igény olyan hőre lágyuló polimerre mátrixanyagként, amelyekből a hagyományos kompozit technológiákkal előállítható kompozit.

Ezen cél elérése érdekében egy megközelítés olyan hőre lágyuló polimer kifejlesztése, amely a hőre keményedő gyantákhoz hasonlóan reaktívan (azaz az alakadó szerszámban) polimerizálható, de a polimerizált polimer hőre lágyuló. Erre lehet alkalmas az elmúlt években kifejlesztett ciklikus oligomerek, mint pl. a ciklikus butilén-tereftalát (CBT). Ez adott hőmérsékleten megolvadva a vízhez közeli viszkozitású (kb. 20 mPas 190°C-on), azaz nagyon folyóképes anyag, ugyanakkor egy bizonyos hőmérséklet felett a megfelelő katalizátor hatására gyűrűfelnýtásos polimerizációval polimerizálódik izoterm módon, azaz nincs hőeffektus, továbbá kristályosodás is végbemegy, és szilárd polimer anyaggá (pCBT) válik (ez voltaképp poli(butilén-tereftalát), csak a gyűrűfelnýtásos in situ polimerizációs gyártástechnológia miatti



megkülönböztetés céljából van elnevezve pCBT-ként). Ezáltal a termék még azelőtt eltávolítható a szerszámból, hogy le kellene hűteni. A kapott termék hátránya, hogy mivel a polimerizáció mellett kristályosodás is végbemegy a túlhűtött állapotban, olyan nagy kristályosság és tökéletes kristályszerkezet jön létre, amitől a polimer rideggé válik. Ezen ridegséget többféle módon próbálják a kutatók csökkenteni, pl. polikaprolaktám kopolimerizációval, gumi adalékkal stb. Sajnos ezen adalékok esetén a szilárdság és modulus jelentősen csökkent. Mi megvizsgáltuk, milyen hatása van a nanocső töltésnek a pCBT szívósságára és mechanikai tulajdonságaira. Mint epoxi mátrix estén, úgy itt is a megfelelő nanocső bekeverési eljárást kellett először kidolgozni. A szakirodalomban fellelhető munkákban a nanotöltőanyagokat a megolvasztott CBT-hez egyszerű keverővel keverték hozzá. A fent említettek alapján a megolvasztott kis viszkozitású CBT-ben nem tud nagy nyírás létrejönni, ami az egymásba akadt és egymáshoz tapadt nanocsöveket az aggregátumokban felbontsa, és a nanocsöveket egyedileg eloszlassa. Kutatásunkban a szakirodalomban ezen anyagok esetén nem alkalmazott homogenizálási módszert alkalmazunk, a szilárd fázisú, nagy energiájú golyósmalomban való keverést. A módszer hatásosságát TEM vizsgálattal támasztottuk alá. A CBT-t melegprésben polimerizáltuk és készítettünk pCBT mátrixú nanokompozitot 0; 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 és 1 tömeg% nanocső tartalommal. Az elvégzett vizsgálatok alapján a 0,25-0,5 tömeg% nanocső adalékolással amellet, hogy a Charpy ütőszilárdságot, azaz a szívósságot 50%-al növelni tudtuk, a hajlító szilárdság és modulus is növekedett 30%-al. Azaz úgy tudtuk a megfelelő elkeverési eljárásnak is köszönhetően növelni a pCBT szívósságát, hogy még a szilárdság és modulus is növekedett [15, 20].

### 3. Összefoglalás

Az eredményeink alapján kijelenthetjük, hogy a kutatás sikeresen zárult. Újszerű mesterkeverékes keverési eljárást, valamint hatékony határfelületi eljárást fejlesztettünk ki, melyek ipari hasznosítása rövidtávon is megoldható. Mindkét technológia hozzájárult, hogy sikeresen teljesítsük a kutatás célkitűzését, a hagyományos rendszereket felülmúló mechanikai tulajdonságokkal rendelkező hibrid rendszer kifejlesztését. A fejlesztett anyagok mechanikai vizsgálatainak eredményei alapján hasznos, versenyképes anyagcsoportot adhatnak a kompozittechnikának, biztonságosabb, megbízhatóbb, nagyobb élettartamú alkatrészek előállítását teszik lehetővé. A kifejlesztett mérési eljárások, új mérési elrendezések, módszerek (dinamikus rétegekzi nyíróvizsgálat, rétegekzi húzóvizsgálat, rétegekzi repedésmegindulás és repedésterjedés követés akusztikus emissziós lokalizációval) szintén értékes eredményei a

kutatásnak, számos hasznos eredményt biztosíthatnak további kutatások során is. A kutatási eredményeket számos rangos külföldi és hazai folyóiratcikkben és konferencia publikációban tettük közzé, tudományos újszerűségüket és értéküket a már rendelkezésre álló hivatkozások is bizonyítják. A kutatás során továbbá 2 diploma, 2 szakdolgozat és 3 TDK dolgozat született, valamint doktorandusz hallgatóm Szabéni Gábor PhD cselekményét elindította, védése várhatóan még idén meg lesz tartva.

#### 4. A projekt eredményeiből készült közlemények

- [1] Szabéni G., Romhány G.: Preparation of multiwall carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites and examination its mechanical properties, 3rd China-Europe Symposium on Processing and Properties of Reinforced Polymers, jún. 11-15, Budapest, 2007
- [2] Szabéni G., Mészáros L., Romhány G.: Többfalú szén nanocsővel erősített epoxi mátrixú nanokompozit előállítása, mechanikai tulajdonságainak elemzése. *Anyagvizsgálók Lapja* 17:(1), 20-26 (2007)
- [3] Szabéni G., Romhány G.: Preparation of MWCNT/carbon fabric reinforced hybrid nanocomposite and examination of its mechanical properties. Absztrakt #SO-13 VI. Országos Anyagtudományi Konferencia, október 14-16, Siófok, 2007
- [4] Szabéni G., Mészáros L., Romhány G.: Többfalú szén nanocső/szénzövet erősítésű hibrid nanokompozit előállítása, mechanikai tulajdonságainak elemzése. *Műanyag és Gumi* 44:(8), 312-315 (2007)
- [5] Romhány G., Szabéni G.: Preparation of MWCNT reinforced epoxy nanocomposite and examination of its mechanical properties. *Plastics, Rubber and Composites*, 37:(5/6), 214-218 (2008) IF=0,443
- [6] Romhány G., Szabéni G.: Preparation of MWCNT/carbon fabric reinforced hybrid nanocomposite and examination of its mechanical properties. *Materials Science Forum*, 589, 269-274 (2008)
- [7] Romhány G., Niedermann P., Szabéni G.: Mechanical properties of MWCNT/fiber reinforced hybrid composites, pp. 1-8 in Proc. International Conference on Technical Textiles and Nonwovens, November 11-13, Delhi, India, 2008
- [8] Szabéni G., Romhány G.: Preparation of MWCNT reinforced epoxy nanocomposite with improved interfacial adhesion, 6 pages in Proc. of the Sixth Conference on Mechanical Engineering. May 29-30., Budapest, Hungary, 2008
- [9] Szabéni G., Romhány G.: Keverési módszer hatása szén nanocső erősítésű epoxi kompozitok mechanikai tulajdonságaira, *Mechanoplast* 2009, március 17-19., Balatonaliga, 2009

- [10] Szebényi G., Romhány G.: The effect of different dispersion methods on the mechanical properties of MWCNT/carbon fiber/epoxy hibrid composites, Absztrakt #P-044 4th China-Europe Symposium on Processing and Properties of Reinforced Polymers, June 8-12, Guilin, China, 2009
- [11] Romhány G., Szebényi G.: Interlaminar crack propagation in MWCNT/fiber reinforced hybrid composites. *eXPRESS Polymer Letters* 3:(3), 145-151 (2009) IF=1,452
- [12] Szebényi G., Romhány G.: The effect of electron irradiation on the mechanical properties of MWCNT/carbon fiber reinforced hybrid nanocomposites, Absztrakt VII. Országos Anyagtudományi Konferencia, október 11-13., Balatonkenese, 2009
- [13] Szebényi G., Romhány G.: Electrical and magnetic field orientation techniques for MWCNT/epoxy nanocomposites, p. 5 (paper ID: 216-ECCM14) in Proc. 14th European Conference on Composite Materials, June 7-10, Budapest, 2010
- [14] Szebényi G., Romhány G.: The effect of electron irradiation on the mechanical properties of MWCNT/carbon fiber reinforced hybrid nanocomposites. *Materials Science Forum* 659:91-95 (2010)
- [15] Romhány G., Vigh J., Thomann R., Karger-Kocsis J., Sajó I.: Polybutylene terephthalate/MWCNT nanocomposites prepared by in situ polymerization of cyclic butylene terephthalate (CBT) after solid phase high energy ball milling of CBT with MWCNT, *Macromolecular Materials Engineering*, közlésre elfogadva, 2011 IF=1,742
- [16] Kungl Zsolt: Elektronsugárzás hatása szén nanocső/epoxi kompozit mechanikai tulajdonságaira. Diplomaterv, BME, 2009, konzulens: Romhány Gábor
- [17] Hamerszki Zsolt: Elektronsugárzás hatása szén/nanocső/szénszál erősítésű hibrid kompozit mechanikai tulajdonságaira. Diplomaterv, BME, 2009, konzulens: Romhány Gábor
- [18] Niedermann Péter: Szén nanocső töltés hatása szénszál erősítésű epoxi laminát rétegek közötti mechanikai tulajdonságára. Szakdolgozat, BME, 2009, konzulens: Romhány Gábor
- [19] Döbrössy János: Szén nanocső orientációjának vizsgálata epoxi mátrixú kompozitokban. Szakdolgozat, BME, 2010, konzulens: Romhány Gábor
- [20] Vigh János: Szén nanocső töltés hatása in situ polimerizált PBT tulajdonságaira. I. díjas TDK dolgozat, BME, 2009, témavezető: Romhány Gábor
- [21] Niedermann Péter: Szén nanocső töltés hatása szénszál erősítésű epoxi laminát rétegek közötti mechanikai tulajdonságára. I. díjas TDK dolgozat, BME, 2008, témavezető: Romhány Gábor
- [22] Niedermann Péter: Szén nanocső töltés hatása szénszál erősítésű epoxi laminát rétegek közötti kifáradási tulajdonságaira. I. díjas TDK dolgozat, BME, 2010, témavezető: Romhány Gábor