



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.

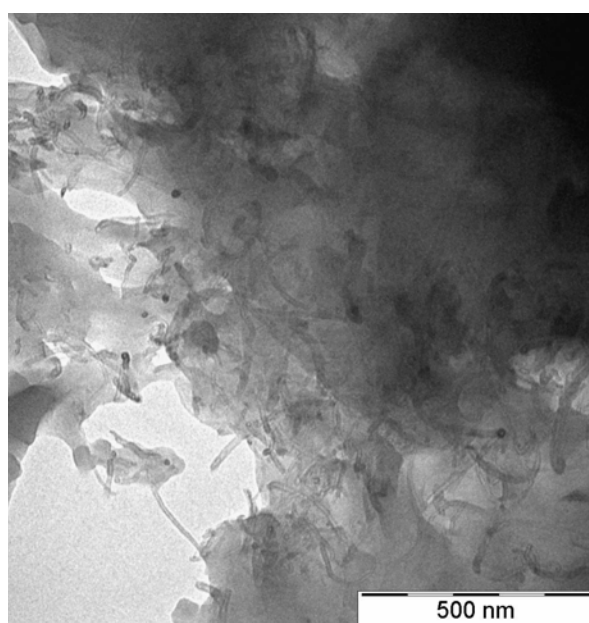
2. Kutatási eredmények

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 méréssel 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 nehézkesé vált. Mechanikai vizsgálataink biztatóak voltak (többek között a hajlító és a rétegközi nyíró tulajdonságokban kaptunk emelkedést a hibrid kompozitok esetén), azonban a feldolgozási problémák miatt új gyantarendszert és eloszlatósi 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 hengerszékes 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 tudtunk járni hengerszéken (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, segítésére 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.

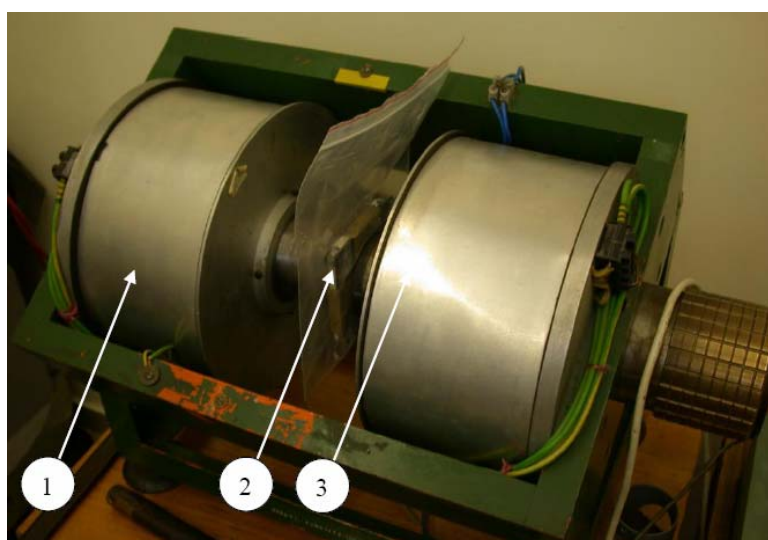
Új módszerként a szén nanocső erősítésű nanokompozitok és a szén nanocső/szénszál erősítésű hibrid kompozitok nagyenergiájú elektronbesugárzását választottuk. Első kísérleteink során tiszta epoxi/szén nanocső rendszert vizsgáltunk, ahol mind a hajlító szilárdságban, mind a rugalmassági moduluszban, mind pedig a bemetszett útve 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]



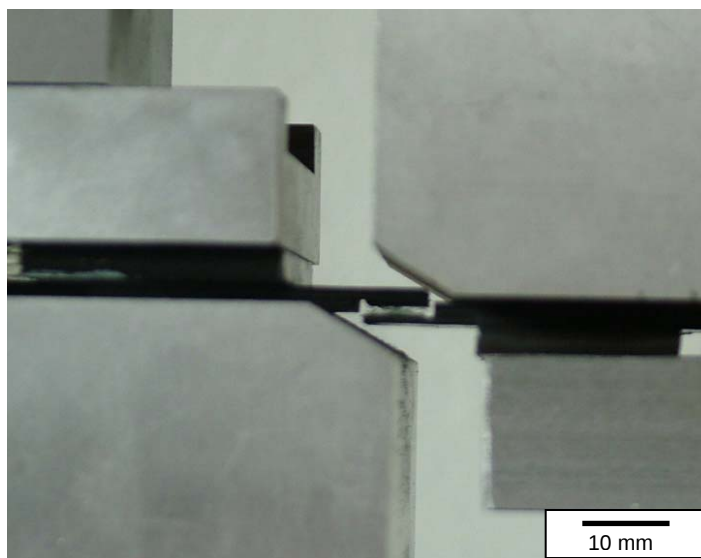
2. ábra Szén nanocsővel töltött epoxi térhálósítása mágneses térben (1) északi mágneses pólus, (2) szerszám, (3) déli mágneses pólus

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 kompozithoz képest.

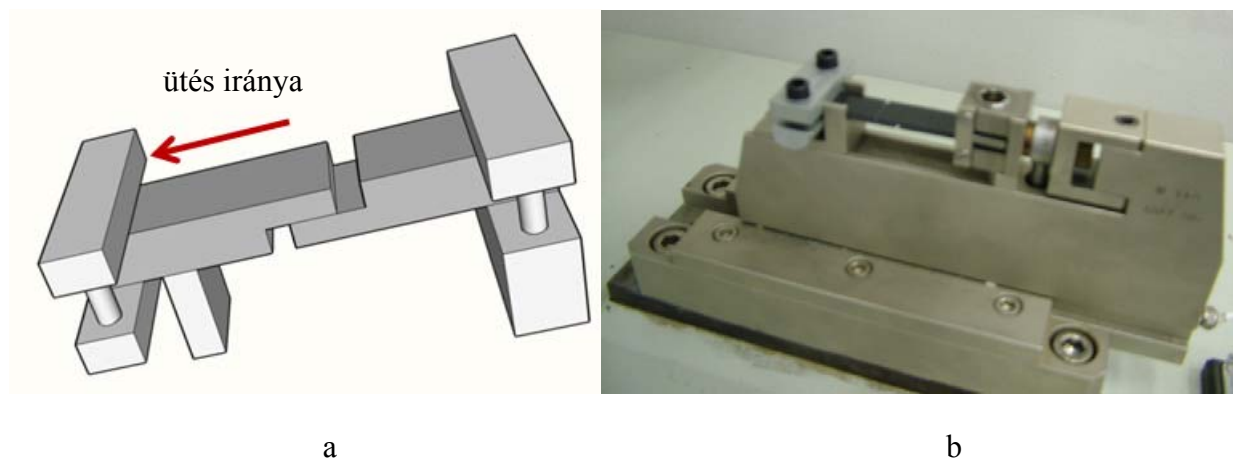
A kutatás során a Iosipescu-féle nyíróvizsgálatot módosítottuk, és ún. rétegek közötti szakító vizsgálatot fejlesztettünk ki (3. ábra). A vizsgálati eredmények szintén kimutatták a szén nanocső töltés előnyét, már 0,1 tömeg% szén nanocső töltésnél is közel 20%-os javulás volt tapasztalható.



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 műszerezett vizsgálatok

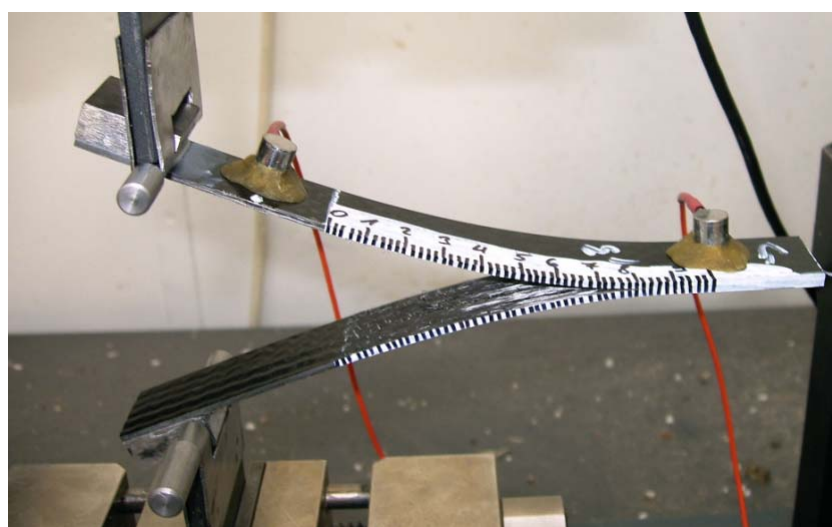
alapján a javítás mechanizmusa szívósítás volt, a nanocső töltés hatására még ezen dinamikus terhelés során is jóval több idő telt el a terhelés ráadásától a tönkremenetelig.



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 mérőhatára 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 mérőhatárú 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 törésmeneti 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 szál erősítésű 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 gyűrűfelfnyitással polimerizációval polimerizálódik izoterm módon, azaz nincs hőeffektus, továbbá kristályosodás is végbemegy, és szilárd polimer anyaggá (pCBT) válik (ez voltaképp poli(butilén-tereftalát), csak a gyűrűfelfnyitással in situ polimerizációs gyártástechnológia miatt)

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 folyóiratokban 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, védeése 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/szénszövet 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