



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Gépészmérnöki kar

Polimertechnika Tanszék

Írta:

Balogh Gábor

okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Czigány Tibor

egyetemi tanár

CIKLIKUS BUTILÉN TEREFTALÁT MÁTRIXÚ KOMPOZITOK FEJLESZTÉSE

című témakörből,
amellyel a PhD fokozat elnyerésére pályázik

BUDAPEST

2012

A doktori disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Karának Dékáni Hivatalában megtekinthetőek.

1. Bevezetés

Napjainkban az elektromos energia felhasználása rendkívüli mértékben növekszik a globalizációnak és a különböző nagyfogyasztású háztartási eszközöknek köszönhetően (1. táblázat). Az energia megtermelésének lehetőségei adottak (pl. víz, gáz, vagy akár atomerőművekkel), de szállítása problémákba ütközik, ugyanis a napjainkban alkalmazott fémbázisú távvezeték-technológia elérte kapacitásának határait. Emlékeztető a 2003 augusztusi, USA-beli nagy áramszünet, melynek oka a távvezetékek nem megfelelő állapota, és nagy belógása volt.

Év	Villamos energia felhasználás [TWh]					
	1990	2000	2005	2009	2010	2011
Magyarország	35	33	35	37	38	42
Európai Unió	1803	2528	2661	2926	2906	3037
USA	2923	3356	3660	3829	3873	3873
Kína	580	1014	1630	3428	3438	3503

1. táblázat A globális energiafelhasználás alakulása 1990-2011 között

A napjainkban alkalmazott távvezeték-technológia elérte alkalmazhatóságának határait, ugyanis ha több energiát vinnénk át a vezetékeken, azok hőmérséklete meghaladná a maximális 80°C-os üzemi hőmérsékletet. További probléma a vezetékek belógása az oszlopok között, amit a hőtágulás és a sodronyszerkezet sajátosságai együttesen okoznak. A sodrony felmelegszik, hossza megnő és szerkezetéből adódóan képes elasztikusan deformálódni. Ennek következtében az önsúly meghajlítja a sodronyt, amely így közelebb kerül a talajhoz. A belógás csökkentése érdekében rövidebb oszlopközoeket és magasabb oszlopokat alkalmaznak. A belógást azért is célszerű elkerülni, mert a távvezeték körül kialakul egy erős elektromágneses mező. Ez, ha túl közel kerül a talajhoz, egészségügyi és egyéb más problémákat is okozhat: a távvezetékek közelében élők körében a fehérvérűség és a különböző alvási problémák gyakoribbak. További gond még a korrózió, mivel a sodronyszerkezet engedi befolyjni az esővizet egészen az acél magig.

A fenti problémákra megoldást jelenthet bizonyos fém alkatrészek helyettesítése polimer kompozittal: ami lehet pl. teherviselő elem, a sodrony magja. A megfelelő kompozit anyagok jobb szilárdság-sűrűség aránnyal rendelkeznek, mint az acél, így kisebb belógást eredményeznek.

A high-tech kompozitokhoz napjainkban általában hőre keményedő mátrixokat (elsősorban epoxi gyantákat) alkalmaznak. Ezek az anyagok kiváló mechanikai tulajdonságokkal

rendelkeznek, amik alkalmassá teszik őket arra, hogy távvezetési sodronyok teherviselő magjai legyenek. Újrahasznosításuk azonban problémás, ezen kívül mikrorepedésekre hajlamosak. Ezen túlmenően az epoxi gyantákat térhálósítani kell, ami időigényes folyamat és lassítja a gyártást. Az előbbi problémák megoldására a hőre lágyuló mátrixanyagok új generációja jelenthet megoldást. Ezek egyik képviselője az *in-situ* polimerizálódó ciklikus butilén tereftalát (CBT) oligomerrendszer. Halmazállapota szobahőmérsékleten szilárd, olvadása után pedig vízszerűen kis (0,1 Pas alatti) viszkozitással rendelkezik, ami megkönnyíti az impregnálást, majd ez után az erősítőszálak között polimerizálódik. Mivel ez egy új anyag, nincsen még hozzá ipari léptékben alkalmazható feldolgozási technológia. A CBT feldolgozásához megfelelőek lehetnek új, kisnyomású technológiák, amelyek kevesebb energiát igényelnek, mint a jelenlegi hőre keményedő gyantákhoz alkalmazott módszerek. Tehát a CBT mátrixú kompozit anyagok alkalmasak lehetnek arra, hogy helyettesítsék a jelenlegi nagyfeszültségű távvezetési sodronyok acél magját.

Mivel a CBT egy kis viszkozitású hőre lágyuló anyag, így belőle könnyen előállíthatóak kompozit lemezek vagy előformák, amelyek egyszerűen tovább alakíthatóak. Ezekre az anyagokra nagy szükség van a kompozit iparban, elsősorban az autógyártás területén.

Dolgozatom célja olyan CBT mátrixú kompozitok kifejlesztése, amelyek megfelelő tulajdonságokkal rendelkeznek ahhoz, hogy nagyfeszültségű távvezetékek magjaként funkcionáljanak. Célom továbbá ehhez megfelelő feldolgozási technológiák kidolgozása.

2. A szakirodalom rövid áttekintése, az értekezés célja

A szakirodalom áttekintése során megállapítható, hogy a nagyfeszültségű távvezeték-technológiában szükség van új anyagokra. Ezeknek az anyagoknak kis hőtágulási együtthatóval kell rendelkezniük, képeseknek kell lenniük akár 160°C-on is üzemelni, és préselhetőeknek kell lenniük a rögzíthetőség érdekében. A kompozit anyagok áttekintése után egyértelmű, hogy szénszál-erősítést célszerű alkalmazni, mivel ennek a szálnak a hőtágulása elhanyagolható, valamint igen jó a villamos vezetőképessége. A megfelelő mátrixanyag kiválasztása már komplikáltabb, annak ellenére, hogy a hőre keményedő mátrixok elterjedtek és sok tapasztalat áll rendelkezésre velük kapcsolatban. Ugyanis ezek az anyagok hosszú távú ciklikus terhelésnek vannak kitéve a távvezetéki oszlopok között, ennek hatására, minimum 30 éves üzemidejük alatt hajlamossá válnak a mikroropedésekre. Meglepő módon a kompozit sodronymagok esetében a hajlítás sokkal kritikusabb igénybevételnek minősül, mint a húzás, a speciális szerelési és alkalmazási körülmények miatt. A szívós hőre lágyuló anyagok áttekintése után kijelenthető, hogy ezek megfelelőek a távvezetékek alkalmazása során fellépő terhelések esetén. De a hőre lágyuló anyagok általában nagy viszkozitással rendelkeznek, aminek oka a hosszú molekulaláncokban keresendő. Ez a probléma az *in-situ* polimerizálódó anyagokkal hidalható át. Így egy reaktív poliésztert, a ciklikus butilén tereftalátot választottam további munkáimhoz, melynek ömledékviszkozitása 0,02 Pas a 190-200°C-os tartományban, a belőle keletkezett pCBT, ami kémiaiilag azonos a PBT-vel, pedig jó időjárásálló. Az alacsony viszkozitás gyorsá és egyszerűvé teszi az impregnálást, de a CBT meglehetősen érzékeny a feldolgozási paraméterekre. Ezen paraméterek megfelelő megválasztásával a CBT kiváló mátrixanyaggá polimerizálható, ami adhézióval kötődik az erősítőszálakhoz. A feldolgozási paraméterek közül néhány leírása megtalálható, de pl. a kristályos hányad és a hűtési sebesség közti összefüggés, illetve a viszkozitás-idő összefüggés a teljes feldolgozhatósági hőmérséklettartományban nem szerepel az irodalomban. Kompozit-előállítási módszereket is ismertet az irodalom (különbéle préseléses eljárások, injektálás, illetve egy speciális prepreg eljárás), de ezek mind komplikáltak, és folyamatos eljárásról nincs még említés sem. Az intervallumprés kvázi-folyamatos, és végtelen lemezek előállítására alkalmas, de rendkívül összetett, és lassú. Emellett az irodalomban szinte elhanyagolható mértékben foglalkoznak szénszálal erősítéssel.

A különféle szívósságnövelő adalékok alkalmazása hasznos lehet, ugyanis így meg lehet kerülni olyan speciális feldolgozási követelményeket, mint pl. a nagyon gyors hűtés. Erre a célra egy szívós poliésztert, a polikaprolaktont (PCL) választottam az irodalomban talált

információk alapján. A PCL alkalmazásával az irodalom már foglalkozott, de vannak még megválaszolatlan kérdések, elsősorban a CBT/PCL mátrixú kompozitok körében.

Különböző nano-adalékokat alkalmaztak már eredményesen pCBT mátrixban, de sikeresen még nem használtak fel őket szálerősített kompozitokban. A grafént pedig nem is vizsgálták még pCBT mátrixban, de véleményem szerint sikeresen lehet vele növelni a hő- és elektromos vezetőképességet. A grafén és szénszál-erősített hibridkompozitok egy még fel nem térképezett terület, ahol a grafén várhatóan növeli a rétegek közötti nyírószilárdságot.

Állandó keresztmetszetű profilok előállítása pultrúzióval a legegyszerűbb. Ezt a folyamatot áttekintve látható, hogy alkalmas kis viszkozitású reaktív anyagok feldolgozására, tehát a pultrúzió adaptálható CBT mátrixhoz.

A fentiek alapján dolgozatom céljai a következők:

1. Pultrúziós technológia fejlesztése, pultruder szerszám tervezése és a feldolgozási paraméterek bemutatása CBT mátrixhoz.
2. Szénszállal erősített, CBT mátrixú kompozit lemezek gyártástechnológiájának kifejlesztése pl. autóiipari féltermék-előállítás céljára, és az így előállított lemezek tulajdonságainak elemzése.
3. Szívósságnövelés polikaprolaktonnal, és az adalékanyag optimális mennyiségének megállapítása nagyfeszültségű alkalmazásokhoz.
4. A pCBT hő- és elektromos vezetőképességének növelése grafén segítségével.
5. A rétegek közötti nyíró tulajdonságok javítása polikaprolakton, vagy grafén hozzáadásával.

3. Alkalmazott anyagok és vizsgálati módszerek

3.1. Felhasznált anyagok

Mátrixanyag

Mátrixanyagként CBT160 típusú, por formájú oligomerrendszert alkalmaztam. Az összes kísérlethez azonos tételből (#000071-25S-01) származó anyagot használtam, amit a Cyclics Europe GmbH-től (Schwarzheide, Németország) szereztem be. A CBT160 3 mól%-ben tartalmaz Fascat 4101 típusú iniciátort (butilónklorid-dihidroxid; Arkema Inc., PA, USA). Felhasználás előtt a CBT port 8 órán keresztül szárítottam légcirkulációs szárítószekrényben 80°C-on.

Mátrixmódosító adalékanyagok

Szívósító adalékként 50 kDa átlagos molekulatömegű polikaprolaktont (CAPA 6505) alkalmaztam, amit a Perstorp Holding AB. (SE)-től szereztem be és olyan állapotban dolgoztam fel, ahogyan a gyártótól átvettem.

Az elektromos és hővezető képesség növelése, és a kompozitok rétegek közötti nyírószilárdságának javítása érdekében Grade H grafént alkalmaztam, amit az XG Sciences Inc-től (Lansing, MI., USA) szereztem be.

Erősítőanyagok

Munkám során két különböző szénszálat használtam. *Unidirekcionális* szénszálstruktúrát (PX35 FBUD0300) a ZOLTEK-től (Nyergesújfalú, Magyarország) és Sigratex KDL 8003 típusú szénszövetet az SGL Group-tól (Wiesbaden, Németország).

3.2. Alkalmazott vizsgálati módszerek

Két különböző vizsgálati típust alkalmaztam: *morfológiai* vizsgálatokat a feldolgozási paraméterek meghatározásához, illetve *'klasszikus' mechanikai vizsgálatokat* a kompozitok vizsgálatához. Az összes vizsgálatot szobahőmérsékleten ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) és $40 \pm 5\%$ relatív légnedvesség mellett hajtottam végre.

3.2.1. Morfológiai vizsgálatok

A *reológiai* méréseket tárcsás reométeren végeztem (Ares, Rheometric Scientific, NJ, USA), 25 mm átmérőjű tárcsákkal, oszcilláló módban. Állandó hőmérsékleteken vizsgáltam a komplex viszkozitás időbeli változását, állandó ($\omega = 40$ rad/s) szögsebességgel és 20 Hz frekvenciával 1 mm résvastagság mellett.

A *kalorimetriai* vizsgálatokat Mettler Toledo DSC821 típusú berendezéssel végeztem el 6-8 mg tömegű mintákon, amiket $20-270^\circ\text{C}$ közötti fűtés-hűtés-fűtés ciklusban vizsgáltam. Az alkalmazott fűtési/hűtési sebesség $10^\circ\text{C}/\text{perc}$ volt.

Gélpermeációs kromatográfiai vizsgálatok: A CBT polimerizációját a 30-70 mg tömegű, porrá őrölt minta 1 ml $\text{CH}_2\text{Cl}_2/\text{HFIP}$ 75%/25%-os arányú keverékében történő feloldása követte 70°C -on. A teljes oldódás után 3 ml kloroform és néhány mikroliter orto-diklorobenzén hozzáadása következett, amit egy $0,45 \mu\text{m}$ -os szűrőn történő szűrés követett. A mérésekhez kloroform/hexafluoro-2-propanol 98%/2%-os oldatát alkalmaztam $0,8$ ml/perces vizsgálati sebességgel, 20°C -os állandó hőmérsékleten.

A *dinamikus mechanikai analízist* TA Instruments Q800 típusú dinamikus mechanikai analízátoron végeztem, $-120 - +150^\circ\text{C}$ -os tartományban, $2^\circ\text{C}/\text{perc}$ fűtési sebességgel.

Méréseimhez húzó elrendezést alkalmaztam a minták ~1 mm-es vastagsága miatt, állandó, 5 μm -os alakváltozás, és 10 Hz frekvencia mellett.

A *termogravimetriai* vizsgálatokat Shimadzu DTG60 típusú berendezésen végeztem szobahőmérséklettől 600°C-ig terjedő tartományban, oxigén atmoszférában.

Az alkalmazott *hővezetés*-mérő eljárás során a lapszerű mintát két ismert hőmérsékletű referencialemmez közé helyeztem. A magasabb hőmérsékletű oldalon mértem a bevitt villamos teljesítményt, amiből hőteljesítményt számítottam. Ebből megkaptam a hőáramot, illetve a hőmérséklet gradienst, továbbá ezek hányadosaként a hővezetési tényezőt.

Az *elektromos vezetőképességet* négypontos ellenállásmérés segítségével vizsgáltam. Az érintkezőket egymástól 20 mm-re helyeztem el.

Kis és nagyszögű *röntgendiffrakciós* vizsgálatokat végeztem tiszta pCBT, és grafénnal módosított pCBT lemezeken. A sugárzás CuK alfa volt, reflexiós módban. A kristályrétegek távolságát a Bragg egyenlet segítségével határoztam meg.

A kompozit minták keresztmetszetéről az *optikai mikroszkópi* felvételek egy Canon Camedia C5060 típusú digitális fényképezőgéppel felszerelt Olympus BX51M típusú optikai mikroszkóppal készültek.

A *pásztázó elektronmikroszkópos* vizsgálatok előtt a minták töretfelületét először aranyfilmmel vontam be egy JEOL FC1200 bevonató berendezéssel, argon atmoszféra alatt. Ezután a bevonatolt felületről JEOL 6380LVa típusú pásztázó elektronmikroszkóppal felvételeket készítettem.

Transzmissziós elektronmikroszkóppal (Zeiss LEO 912 Omega) vizsgáltam a grafén részecskék eloszlottságát a pCBT mátrixban. A mikroszkóp gyorsító feszültsége 120 kV volt. Az 50 nm vastag mintákat gyémánpengés Leica EM UC6 típusú ultramikrotommal készítettem el.

3.2.2. Mechanikai vizsgálatok

A mechanikai vizsgálatokat az előállított kompozitok minősítése, és az alkalmazott módosító anyagok hatásának vizsgálta érdekében végeztem el.

A *húzó vizsgálatokat* Zwick Z005 típusú terhelőgépen (Zwick/Roell GmbH, Ulm, Németország) végeztem az MSZ EN ISO 527 szabványnak megfelelően 20 mm/perces keresztfejsébséggel.

Rétegek közötti nyíró vizsgálatok

A *statikus rétegek közötti nyíró* vizsgálatokat Zwick Z020 típusú terhelőgépen (Zwick/Roell GmbH, Ulm, Németország) végeztem el, az ASTM-D 3846-94 szabványban leírtak szerint, 1,3 mm/perces vizsgálati sebességgel.

A *dinamikus rétegek közötti nyíró* vizsgálatokat Ceast Resil Impactor Junior műszerezett, DAS 8000 adatgyűjtővel ellátott ütőművön végeztem el az MSZ EN ISO 5265 szabvány szerint, az ASTM-D 3846-94 szabványnak megfelelő próbatestekkel. A kalapács energiája 15 J, sebessége pedig 3,7 m/s volt.

A *hárompontos hajlítóvizsgálatokat* Zwick Z020 típusú terhelőgépen (Zwick/Roell GmbH, Ulm, Németország) végeztem el az MSZ EN ISO 14125 szabványnak megfelelően, 5 mm/perces keresztfejsebesség mellett. Az alkalmazott alátámasztási távolság a minta vastagságától, és az erősítőanyag típusától függött, míg a minták szélessége minden esetben 15 mm volt.

A műszerezett *Charpy-féle ütővizsgálatokat* DAS 8000 adatgyűjtővel felszerelt Ceast Resil Impactor Junior ütőművön végeztem el az MSZ EN ISO 179 szabványnak megfelelően. A kalapács energiája 15 J volt, az alátámasztási távolság pedig 62 mm a bemetszetlen I-es típusú próbatestek esetében.

A *száttartalmat* (tömegszázalékban) a mátrix kiégetésével határoztam meg Nabertherm típusú kemencében, 600°C-on, 30 percig történő hőntartással az MSZ EN ISO 3451 szabványban leírtak alapján.

3.3. Próbatestek előállítása

3.3.1. Próbatestek a morfológiai vizsgálatokhoz

A morfológiai vizsgálatokhoz Collin P200E típusú fűthető-hűthető présben 240°C-on, 15 perc polimerizációs idő és 2 MPa présnyomás mellett 1 mm vastag lemezeket állítottam elő.

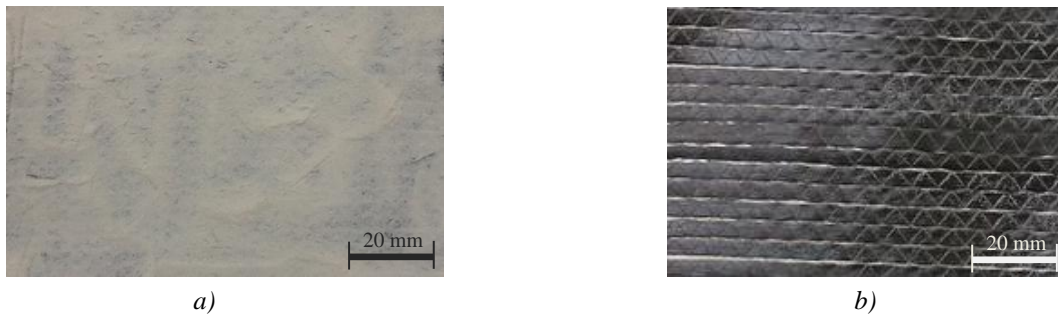
Az adalékanyagokat (polikaprolakton és grafén) és a CBT-t ömledékállapotban kevertem össze Brabender PlastiCorder PL 2000 típusban belső keverőben, 200°C-on, 180 fordulat/perces keverési sebességgel 2 percig. Ezt követően a keveréket ledaráltam, majd a darálékot az előzőekben leírtaknak megfelelően préseltem.

3.3.2. Kompozit próbatestek

Prepreg módszer

Prepreggyártás: A szénszövetet beszórtam CBT porral (1. ábra/a), majd ezt egy 195°C-ra előfűtött kemencébe helyeztem 1 percre, hogy megolvadjon a por, és befolyjon az erősítőszálak közé. Ezután a prepreget kivettem a kemencéből, és hagytam lehűlni (1. ábra/b),

ami a gyűrűfelnyílásos polimerizációt befagyasztotta. A befagyott reakció miatt a prepreg akár szobahőmérsékleten is elméletileg végtelen polcidővel és nem ragacsos felülettel rendelkezik, ami megkönnyíti a tárolást.



1. ábra Por prepregok előállítása: CBT porral beszórt UD szénszövet (a); prepreg (b)

Préselés: A kompozit lemezeket az előzőekben előállított prepregokból készítettem el, préseléssel. Ezek a lemezek 8 réteg prepregot tartalmaztak, szövet esetén (0/90°), UD esetén pedig tisztán 0°-os rétegrenddel. Az egymásra helyezett prepregokat 240°C-ra előmelegített présbe (Collin P200E) helyeztem 15 percre és 2 MPa présnyomás alá, majd a prés beépített hűtőrendszerével ~50°C/perces hűtési sebességgel lehűtöttem. Az így előállított lemezek ~60 tömeg% szénszálat tartalmaztak.

A szívósító anyagot (polikaprolaktont) a szárított CBT porhoz adtam hozzá, és daráló berendezésben porkeveréket állítottam elő. Mivel a PCL nem növeli jelentősen a kezdeti viszkozitást, így prepreg módszerrel megfelelő minőségű kompozitokat állíthattam elő.

Premix módszer

Az CBT-hez a grafént ömledékállapotban kevertem hozzá Brabender PlactiCorder PL 2000 típusú belső keverővel 200°C-on, 180 fordulat/perces sebességgel, 2 percig, majd ezt az 'előpolimert' porrá őröltem. Ezt a port eloszlattam egy réteg erősítőanyagon, majd erre egy újabb réteget helyeztem, beszórtam porral, egészen addig, amíg egy 8 réteg vastagságú szerkezetet nem kaptam. Ezt aztán behelyeztem a 240°C-ra előfűtött Collin P200E típusú présbe, és 15 percig 2 MPa présnyomással préseltem. Ezzel a módszerrel ~2 mm vastag próbatesteket állítottam elő, átlagosan 60 tömeg% száltartalommal.

4. Új tudományos eredmények – tézisek

1. TÉZIS

Differenciális pásztázó kalorimetriai (DSC) vizsgálatokkal igazoltam, hogy minimum $50^{\circ}\text{C}/\text{perc}$ hűtési sebességgel 40%-nál kisebb kristályos részarányú, szívós, polimerizált ciklikus butilén tereftalát (pCBT) állítható elő. Ennek oka, hogy gyors hűtés során a molekulák nem tudnak szabályos kristályos fázisba rendeződni, így a polimer kevésbé viselkedik ridegen, és kompozitok előállítására alkalmas [2, 3, 4, 7].

2. TÉZIS

Reológiai és gélpermeációs kromatográfiai vizsgálatokkal igazoltam a ciklikus butilén tereftalát (CBT) alkalmasságát folyamatos kompozitgyártási technológiához. Mivel a CBT gyűrűfelnylásos polimerizációja az impregnálási folyamat után zajlik le, így a mátrix viszkozitása a gyűrűk felnyílását követően, egészen a polimerizáció megindulásáig alacsony ($0,02\text{-}0,05\text{ Pas}$), s csak a polimerizáció beindulása után kezd növekedni [1, 3, 4, 6].

3. TÉZIS

Dinamikus mechanikai analízis (DMA) vizsgálatokkal empirikusan, valamint a Fox egyenlet alkalmazásával elméletileg is alátámasztottam azt a korábban már ismert, de nem kellően bizonyított ténytet, hogy a CBT és a polikaprolakton (PCL) között kopolimerizáció zajlik le, amelyet az üvegesedési átmenethez tartozó hőmérséklet eltolódása mutat. DSC vizsgálatokkal igazoltam, hogy a kopolimerizáció következtében az anyag kristályos részaránya csökken, ami a szívósság növekedésével jár. A szívósító hatást támasztja alá továbbá, hogy a húzóvizsgálatok során 10 tömeg% PCL hozzáadása esetén a szakadási nyúlás hatszorosára növekedett. Ezen túlmenően a PCL szignifikánsan, 25%-kal megnövelte a szénszállal erősített kompozitok dinamikus rétegekzi nyírószilárdságát. Ennek magyarázata, hogy a PCL szívósabbá tette az erősítőrészek közötti mátrixfilmet [7].

4. TÉZIS

Igazoltam, hogy a grafén kristálygócképző hatása a gyűrűfelnylással polimerizálódó CBT-ben is érvényesül, mivel 5 tömeg% grafén hozzáadása esetén a kristályosodási csúcs 189°C -ról 202°C -ra emelkedik $10^{\circ}\text{C}/\text{perces}$ hűtési sebesség mellett a heterogén göcképzés következtében, azaz a grafén jelenlétében a túlhűthetőség mértéke csökken. Bizonyítottam

továbbá, hogy a grafén 0-5 tömeg%-os tartományban növeli a CBT ömledék kezdeti viszkozitását, illetve a polimerizálódott CBT elektromos- és hővezetési tényezőjét. Az utóbbi jelenség oka, hogy a grafén egy „hálós” szerkezetet hoz létre a pCBT mátrixban, aminek következtében az elektromos vezetőképesség tíz nagyságrenddel 1 mS/cm-re, a hővezető képesség pedig 80%-kal 0,21 W/mK-re növekszik [5].

5. TÉZIS

Igazoltam, hogy 0,5 tömeg% grafén jelenléte megnöveli a szénszállal erősített pCBT mátrixú kompozitok statikus rétegeközi nyírószilárdságát. Ennek oka, hogy a mátrixban keletkező, és növekvő repedésnek meg kell kerülnie a mátrixba beépült grafén nanolemezeket. 0,5 tömeg% felett ezzel ellentétes jelenség játszódik le, ugyanis nagyobb nanorészecske-tartalom mellett agglomerátumok jelennek meg, amelyek gyenge helyként viselkednek, és repedések kiindulópontjaivá válnak [5].

5. Saját közlemények jegyzéke

Folyóiratcikkek

1. **Balogh G.**, Czigány T.: Pultrúziós berendezés tervezése. *Gép*, **60**, 3-6 (2009).
2. **Balogh G.**, Czigány T.: Effect of air humidity on the mechanical properties of in-situ polymerized cyclic butylene terephthalate matrix composites. *Materials Science Forum*, **659**, 1-5 (2010).
3. **Balogh G.**, Czigány T.: Effect of low UD carbon fibre content on mechanical properties of in situ polymerised cyclic butylene terephthalate. *Plastics, Rubber and Composites*, **40**, 121-124 (2011). IF=0,257
4. **Balogh G.**, Czigány T.: A ciklikus butilén-tereftalát (CBT) mint újszerű kompozit mátrixanyag és feldolgozása. *Műanyag és Gumi*, **48**, 234-240 (2011).
5. **Balogh G.**, Hajba S., Czigány T.: Ciklikus butilén tereftalát (CBT) mátrixú, grafén és szénszál erősítésű hibridkompozitok fejlesztése. *Műanyag és Gumi*, (közlésre elfogadva, várható megjelenés: 2012 június).

Konferenciatickek

6. **Balogh G.**: Termoplasztikus mátrixú pultrúziós technológia fejlesztése, Erősített Műanyagok 2010. Nemzetközi Balaton Konferencia, Keszthely, Magyarország, 2010. 05. 18-20. CD Proceeding p4.
7. **Balogh G.**: CBT as a novel matrix material and its processing techniques for composites. SPE Eurotec Conference. Barcelona, Spanyolország, 2011.11.14-15. p. 1-5, online proceeding (2011).

Konferencia-előadások

8. **Balogh G.**, Szaplanczay P.: Pultrudált kompozitok a nagyfeszültségű távvezetékek területén. Erősített Műanyagok 2008. Nemzetközi Balaton Konferencia, Keszthely, Magyarország, 2008. 05. 20-22.
9. **Balogh G.**, Czigány T.: Effect of air humidity on the mechanical properties of cyclic butylene terephthalate composites. VII. Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, 2009. 10. 11-13 (poszterelőadás)
10. **Balogh G.**: Termoplasztikus mátrixú pultrúziós technológia fejlesztése. Erősített Műanyagok 2010. Nemzetközi Balaton Konferencia, Keszthely, Magyarország, 2010. 05. 18-20.
11. **Balogh G.**: CBT as a novel matrix material and its processing techniques for composites. SPE Eurotec Conference. Barcelona, Spanyolország, 2011. 11. 14-15.