



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Polimertechnika Tanszék

PhD értekezés

**EPOXIGYANTA ALAPÚ ALAKEMLÉKEZŐ POLIMER
KOMPOZITOK FEJLESZTÉSE**

Tézisfüzet

Készítette: Fejős Márta

okleveles környezetmérnök

Témavezető: Dr. Karger-Kocsis József

egyetemi tanár

Budapest, 2015

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

1. Bevezetés

Az anyagtudomány területén a kutatók a 20. század közepétől foglalkoznak intelligens anyagokkal. Az intelligens anyagok olyan funkcionális (tehát elsősorban nem szerkezeti) anyagok, amelyek közvetlen környezetük bizonyos állapotváltozásaira saját állapotuk jelentős megváltoztatásával gyors, egyértelmű és reverzibilis választ adnak. Az alakemlékező anyagok olyan intelligens anyagok, amelyek valamilyen környezeti tényező megváltozásának (külső inger) hatására jelentős alakváltoztatásra képesek. A külső inger lehet a hőmérséklet, a mágneses térerő, az elektromos áramerősség, a fény, a nedvességtartalom, vagy akár a kémhatás megváltozása. Az alakemlékezés jelenségét számos anyagcsalád esetében (fémek, polimerek, kerámiák, gélek) leírták. Ezek közül az alakemlékező fémötvözetek és az alakemlékező polimerek a legjelentősebbek.

Az alakemlékező polimerek deformálhatósága, amely elérheti a 800%-ot is, jelentősen meghaladja az alakemlékező fémötvözetekre jellemző 1-8%-ot. Az alakemlékező polimerek kedvező ára az alakemlékező fémek kiváltását ösztönzi, azonban kis visszaalakulási feszültségük problémát jelent a legtöbb alkalmazásnál.

Az epoxigyanta (EP) kémiai térhálósomópontjai és széles határok közt beállítható üveges átalakulási hőmérséklete (T_g) miatt kiváló hőre reagáló alakemlékező polimernek számít. Az alakemlékező epoxigyanták deformálhatósága (<80%) csekélyebb a többi alakemlékező polimerénél, de nagyobb rugalmassági modulusuk miatt szerkezeti anyagként jobban alkalmazhatók. Az epoxigyanta emellett hagyományosan jó mátrixanyag, mivel jó határfelületi kapcsolat alakítható ki a különféle erősítőanyagokkal (p. üvegszál, szénszál) történő társításkor. Ezeket együttvéve az alakemlékező epoxigyanták a legalkalmasabb jelöltek az alakemlékező fémek kiváltására olyan jármű-, robot- vagy űrtechnikai területeken, ahol az alakemlékező egységnek valamilyen mechanikai terhelés ellenében kell visszaalakulnia (mozgató, beavatkozó szerkezetek).

2. Irodalmi áttekintés és célkitűzések

Az epoxigyanta képes rögzíteni egy az eredeti alaktól eltérő ideiglenes alakot úgy, ha T_g -jénél magasabb hőmérsékleten, tehát nagyrugalmas állapotában deformálják, és a külső kényszer fenntartása mellett a T_g -je alá hűtik. Az anyag az ideiglenes alakból külső kényszer alkalmazása nélkül visszaalakul az eredeti alakba, amint a T_g -je fölé melegítik. Az epoxigyanták alakrögzítése és visszaalakulása is legalább 95%-os jóságú. A legtöbb alakemlékező polimer ennél rosszabb rögzítési és visszaalakulási képességekkel rendelkezik.

Az epoxigyantákat eredményesen lehet erősíteni a legkülönbözőbb erősítő szálakkal: üvegszál, szénszál, természetes növényi szálak stb. Az alakemlékező epoxigyanta alapú kompozitokat például az űrben használatos nagyméretű szerkezetek (reflektor, antenna, napelem stb.) vázaként tudják alkalmazni, hogy ezeket összehajtogatott, ideiglenes formában tudják szállítani az alkalmazási helyre, majd ott valamilyen inger (főként elektomos áram, vagy napsugárzás) hatására maguktól kihajtogatódnak. Ezzel gazdaságosabbá lehet tenni ezen eszközök űrben történő szállítását.

Kereskedelmi forgalomban már kaphatók szénszövet erősítésű epoxigyanta mátrixú kompozitok kinyíló szerkezetek előállítására, de az erősítőanyagok alakemlékező képességre gyakorolt hatását tárgyaló tanulmányok hiányoznak a szakirodalomból. Emiatt célul tűztem ki a hagyományos erősítőanyagok (üvegszál, szénszál) alakemlékező képességre gyakorolt hatásának vizsgálatát, az ezzel kapcsolatos lehetőségek és problémák feltárását, valamint a kutatásra érdemes irányvonalak feltérképezését.

Hagyományos erősítőszálak mellett a növényi eredetű erősítőszálak alakemlékezésre gyakorolt hatását is érdemes megvizsgálni, mivel szakadási nyúlásuk hasonló, vagy egyes esetekben jobb is lehet a hagyományos erősítőanyagokénál. Azonban növényi eredetű erősítőszál, amely megújuló forrásból származik, érdemes szintén megújuló eredetű mátrixba ágyazni, ezzel is csatlakozva a megújuló forrásból előállítható (növényi eredetű) polimerek (biopolimerek) fejlesztéséhez. Természetes anyagokból előállított epoxigyanta alapú alakemlékező polimer kompozitokra egyáltalán nincs példa a szakirodalomban, így emiatt is érdemes ezen a területen kísérleteket tenni. Bio-

epoxigyantát létre lehet hozni epoxidált növényi olajok (szójaolaj és lenolaj a leggyakoribb) anhidrides térhálósításával. Erősítőanyagok pedig különféle növényi rostokból (len, kender, juta, kenaf, szizál, bambusz stb.) állíthatók elő.

Míg erősítetlen epoxigyanta alakemlékezését húzó igénybevétellel szokás vizsgálni, addig a szál- vagy szöveterősítéses kompozitokét hajlító igénybevétellel. Hajlításnál azonban kétféle igénybevételnek van kitéve lokálisan az anyag: a semleges száltól a kisebb görbületi sugarú ív felé nyomó, a nagyobb görbületi sugarú ív felé pedig húzó igénybevétel lép fel. Az alakemlékezést is eltérően befolyásolhatja az erősítőanyag annak megfelelően, hogy a nyomott, vagy a húzott oldalon helyezkedik el. Ezt aszimmetrikusan erősített epoxigyanta mátrixú kompozitokon célszerű vizsgálni.

Az alakemlékező epoxigyanták egyirányú alakemlékezésre képesek. A kétirányú alakemlékezés hiányát kompenzálja az, hogy előállíthatók két vagy több alakra emlékező epoxigyanta alapú anyagtársítások. A több alakra emlékező polimerek fejlesztése új perspektívákat nyithat meg az alkalmazásokat tekintve. Molekulatervezéssel komoly vegyészmérnöki feladat ilyen polimerek előállítása, de az epoxigyanták esetében lehetőség van ezt megoldani különböző T_g -jú epoxigyanták egymásra rétegezésével vagy olyan részbenkristályos polimer (pl. polikaprolakton) szálpaplan epoxigyantába ágyazásával, ahol az epoxigyanta T_g -je alacsonyabb a szál kristályolvadási hőmérsékleténél és a szálak egy térbeli struktúrát alkotnak. Különböző T_g -jú epoxigyanták egymásra rétegezésénél az alakemlékező jellemzőket (alakrögzítési és visszaalakulási tényezők) a rétegvastagság-arányok vagy a rétegek mechanikai jellemzőinek (modulus, merevség) változtatásával lehet optimalni. Az epoxigyantába ágyazott részbenkristályos szálpaplan esetében az alakemlékező jellemzők optimalása az összetevők arányának és mechanikai jellemzőinek változtatásán kívül a szálpaplanban található szál-keresztezések számának, tehát a morfológia változtatásával is megoldható. Ezen módosítási lehetőségek többségét még nem vizsgálták.

A szakirodalomban megtalálható két alakra emlékező epoxigyanta alapú anyagtársítások közül az epoxigyanta mátrixba ágyazott részbenkristályos, hőre lágyuló polimer szálpaplanból álló rendszer módosítására ad lehetőséget a szálképzés

során a szálak belsejébe és/vagy felületére juttatható nanorészecskék (pl. szén nanocső, grafén).

Amennyiben a hőre lágyuló, részbenkristályos komponens oldódik az epoxigyanta epoxi komponensében, akkor ez egy újfajta, *in-situ* módszert jelenthet két alakra emlékező epoxigyanta alapú anyagársítások előállítására. Ez az *in-situ* előállítási módszer alkalmazható lehet a szakirodalomban megtalálható két alakra emlékező EP/PCL anyagársítás esetében, mivel a PCL oldhatósági paramétere közel áll az epoxi komponenséhez, így valószínűleg oldódik benne.

Az irodalomkutatás alapján az alábbi kutatási célokat tűztem ki:

- Az alakemlékező epoxigyanták különféle erősítőanyagokkal (üvegszál, szénszál, növényi szálak) történő társítása, és az erősítés hajlító elrendezésben mért alakemlékező jellemzőkre (üveges átmeneti hőmérséklet, alakrögzítési és visszaalakulási képesség, visszaalakulási feszültség, deformálhatóság mértéke) gyakorolt hatásának vizsgálata, összefüggések feltárása és elemzése.
- Aszimmetrikus erősítés hatásának vizsgálata alakemlékező epoxigyanta alapú kompozitok hajlító igénybevételű alakemlékező jellemzőire (alakrögzítési és visszaalakulási képesség, visszaalakulási feszültség, deformálhatóság mértéke).
- Két alakra emlékező EP/PCL szálpaplan anyagársítás módosítása grafén nanorészecskékkel. A grafén nanorészecskék morfológiára és alakemlékező jellemzőkre (alakrögzítési és visszaalakulási képességek) gyakorolt hatásának vizsgálata, és ezek összefüggéseinek elemzése.
- Két alakra emlékező EP/PCL anyagársítás előállítása *in-situ* módon, és ennek összehasonlítása EP-be ágyazott PCL szálpaplan anyagársítással különös tekintettel az alakemlékező jellemzőkre (alakrögzítési és visszaalakulási képességek).

3. Vizsgált minták és vizsgálati módszerek

Üvegszövet-, szénszövet- és unidirekcionális szénszállal erősített epoxigyanta mátrixú kompozitokat készítettem kézi laminálással, illetve préseléssel. Az alkalmazott epoxigyanták ez esetekben kereskedelmi forgalomban kapható, aminos térhálósítósú gyanták voltak. Szénszövettel aszimmetrikusan erősített kompozit mintákat úgy állítottam elő, hogy részlegesen térhálósított, de már szilárd laminátokat szilikon lapkákkal egy üveglapos öntőszerszám egyik falához szorítva a fennmaradó helyet gyantával kiöntöttem. Növényi szálerősítéses biokompozitokat préseléssel készítettem. Különböző struktúrájú (sávolyiszövet, kvázi-unidirekcionális szövet) len-, juta- és kenderszálakból álló erősítőanyagokat 80°C-on 2 órán át tartó szárítás után azonnal impregnáltam kétféle, térhálósítási mechanizmusában alapvetően eltérő bioepoxigyantával. Az egyik bioepoxigyantát epoxidált lenolaj anhidriddel, a másikat szorbit poliglicidil éter glicerinnel alapú triaminnal történő térhálósításával nyertem.

PCL nanoszálakat elektrospinneléssel 3,5 m%-os oldatból állítottam elő, ahol az oldószer diklórometán és etanol keveréke volt. Grafénnel módosított PCL előállításához az említett PCL oldathoz a PCL 3,5 m%-ának megfelelő mennyiségű grafént adtam, amelyet hűtés mellett ultrahangos keverővel diszpergáltam. A grafén nélküli és a grafént is tartalmazó PCL oldatokból elektrospinneléssel állítottam elő PCL szálpaplant. A PCL és a PCL/grafén szálpaplanokat szobahőmérsékleten vákuummal segített gyantainfúzióval ágyaztam aminos térhálósítósú epoxigyantába, majd szobahőmérsékleten térhálósítottam 48 órán keresztül. Az így kikeményedett mintákat 80°C-on 2 órán keresztül utótérehálósítottam. Ezalatt a PCL szálak megolvadtak, majd lehűtés során újrakristályosodtak. Ezzel kialakult a minták végső mikroszerkezete.

Szálképzést nem igénylő 23 m% PCL tartalmú EP/PCL mintákat készítettem az alábbi *in-situ* eljárással. A PCL granulátumot oldottam 100°C-on az epoxi komponensben, amelyet egy órán át kevertem. Ezután a keverés mellett 70°C-ra hűtött oldathoz hozzáadtam az aminos térhálósítót, és két perc homogenizálás után nyitott szerszámba öntve szobahőmérsékletre hűtve térehálósítottam 48 órán keresztül. Ezután 80°C-on utótérehálósítottam 2 órán keresztül.

Szálerősítéses kompozitokat és referencia mintáikat hárompontos hajlító elrendezésben 20, 40, illetve 50 mm alátámasztási távolsággal vizsgáltam. A T_g meghatározására dinamikus mechanikai analízist (DMA, Q800, TA Instruments) végeztem 3°C/perc felfűtési sebességgel és 1 Hz gerjesztési frekvenciával. A minták deformálhatóságát a DMA berendezésben alakadási hőmérsékleten ($T_d > T_g$) végzett kvázi statikus hajlítással vizsgáltam. A hajlítást erővezérléssel és 3 N/perc terhelési sebességgel végeztem. A minták alakemlékező képességét szintén DMA berendezésben vizsgáltam. Az alakrögzítési és visszaalakulási képességeket szabad visszaalakulású, a visszaalakulási feszültségeket pedig teljesen gátolt visszaalakulású alakemlékező vizsgálatokkal állapítottam meg. A biokompozitok és referenciáik esetében 150 N-os erőmérő cellával rendelkező GABO Eplexor DMA berendezésben végeztem a kvázi statikus hajlítást. Ez esetben az alakrögzítési és visszaalakulási tényezőket részlegesen gátolt visszaalakulású alakemlékező vizsgálatból határoztam meg szintén a GABO Eplexor DMA-ban.

Két alakra emlékező EP/PCL anyagátársítások esetében az átmeneti hőmérsékleteket elsősorban differenciális pásztázó kalorimetriával (DSC, Q2000, TA Instruments) határoztam meg 10°C/perc fűtési, illetve hűtési sebességet alkalmazva. Az átmeneti hőmérsékletek vizsgálatára másodsorban DMA-t alkalmaztam 3°C/perc felfűtési sebességgel húzó elrendezésben 10 mm befogási hosszal és 10 Hz gerjesztési frekvenciával. Ezeknél a mintáknál a deformálhatóságot kvázi statikus húzással vizsgáltam. A húzást erővezérléssel és 3 N/perc felterhelési sebességgel végeztem a Q800 DMA berendezésben. A két alakra emlékező minták alakrögzítési és visszaalakulási tényezőit szintén húzó elrendezésben vizsgáltam a DMA berendezésben.

Az EP/PCL minták mikroszerkezetének morfológiai vizsgálataihoz pásztázó elektronmikroszkópiát (SEM, JEOL JSM-6380LA) alkalmaztam. Ezekhez a vizsgálatokhoz a mintákat folyékony nitrogénnel történő hűtés után törtem, illetve üveggéssel felszerelt mikrotómmal (Leica EM UC6) vágtam -80°C-on. SEM vizsgálat előtt a töretfelületet, illetve a vágott felületet Au/Pd ötvözetrel vontam be.

4. Eredmények

Munkám során az EP alapú alakemlékező kompozitok fejlesztésének két fő irányával foglalkoztam. Az egyik a hosszúszálas erősítőanyagok alakemlékezésre gyakorolt hatásainak vizsgálatát, a másik pedig az EP/PCL anyagtársítással létrehozható, két alakra emlékezés fejlesztését jelentette.

Az epoxigyanta T_g feletti hajlító igénybevételű deformálhatóságát csökkenti a hosszú szálas erősítő struktúrák alkalmazása, mert az erősítőanyag merevsége nem, illetve csak elhanyagolható mértékben csökken a melegítés hatására. Az alakrögzítő képesség valamelyest romlik, mivel az erősítőszálak „nagy erővel” törekednek vissza eredeti állapotukba, amely erőket a mátrix „befagyása” sem tudja teljes mértékben ellensúlyozni. A hosszúszálas erősítés visszaalakulási feszültség-növelő hatását és a nem kívánatos mellékhatásait üveg-, szén- és növényi szálakkal erősített EP kompozitokon vizsgáltam hajlító igénybevétellel. Az üvegszál két nagyságrenddel növeli az EP visszaalakulási feszültségét, amely így elérheti a 40-50 MPa tartományt. Ez ugyan a fémeknél mérhető érték (150 MPa) harmadát jelenti, de már elegendő lehet egyes műszaki alkalmazásokhoz. Ezekben az alakemlékező kompozitokban a deformálhatóság 1,2% szélsőszál-nyúlás alá, és az alakrögzítő képesség 100%-ról 80%-ra csökkent. A visszaalakulási képesség pedig nem romlott, maradt 100%. Hasonló tendencia figyelhető meg szénszálas erősítésnél is.

Növényi szálas erősítésnél az alakrögzítési és visszaalakulási tényezők is alacsonyak, de az alkalmazott megújuló forrásból származó mátrix miatt ezt nem indokolt a mesterséges szálakkal összevetni. Annyit azonban meg lehet állapítani, hogy a növényi szálak nagy mértékben (akár 30°C-kal) képesek csökkenteni az EP T_g -jét, amely függ a térhálósító jellegétől (amin vagy anhidrid), az erősítőanyag mennyiségétől és maradék víztartalmától.

Ha szénszálerősítést választunk – amelynek hőtágulási együtthatója (ellentétben az epoxigyantáéval és az üvegszövetével) negatív, vagyis melegítés hatására zsugorodik – és ezt az erősítőanyagot a kompozit lemeznek arra az oldalára helyezjük, ahol a hajlítás során húzó igénybevétel alakul ki, akkor a hőmérséklet változásával a hőtágulási együtthatókból adódó különbség és az aszimmetria önmagában, tehát

programozás nélkül mozgatni fogja a lemezt, és ez az alakrögzítési és visszaalakulási tényezőket növeli. Ugyan a visszaalakulási feszültség (3-10 MPa) kissé csökken (de még mindig egy nagyságrenddel nagyobb az erősítetlen epoxihoz viszonyítva), viszont a deformálhatóság 2,5%-ig növelhető, és az alakrögzítő képesség is 100%-os.

EP mátrixba ágyazott, hőre lágyuló, kristályos polimer szálpaplanból álló rendszer két alakra emlékező képességgel bír, ha az EP T_g -je kisebb a kristályos polimer szálrendszer olvadási hőmérsékleténél (T_m). T_m felett, ahol egyébként a szálpaplan struktúrája nem változik, mert a mátrix körbeölel minden egyes szálat, a deformált próbatestet T_m alá hűtve lehet rögzíteni az első átmeneti alakot. A T_m alatt kikristályosodó polimer kb. 70%-os jósággal tartja meg az első átmeneti alakot. Ezután az epoxigyanta T_g -jének segítségével lehet rögzíteni a második átmeneti alakot. Ennek a módszernek az a hátránya, hogy a szálpaplan impregnálása EP-vel nehéz feladat, amelyet a szálpaplan erősítésével lehet könnyíteni. Ha a szálképzés során (amely elektrosztatikus erő segítségével történik) grafén nanolemezeket juttatunk a szálak közé, amely a szálakat jobban eltartja egymástól, akkor az impregnálás (vákuummal segített gyantainfúzió) során nem tapadnak össze, és az epoxi jobban be tud folyni a szálak közé. Ez azonban nem javít a szálpaplan rossz alakrögzítő képességén. A grafén nélküli EP/PCL szálpaplan előállításakor egyes szálszakaszok, amelyek egymással összetapadtak, és nem tudott a gyanta közéjük folyni szálkötegekké olvadtak össze. Ezzel a PCL fázis térháló-csomópontjainak száma megnőtt, amelynek révén jobb alakrögzítés valósulhat meg a grafénes mintához képest, ahol a szálak összeolvadását a grafén gátolja.

Mivel a PCL ömledék állapotban oldható az epoxi komponensben, ezért *in-situ* is előállítható EP/PCL anyagtársítás, amely a szálpaplanos mintáéval megegyező PCL tartalomnál szintén kettős folytonos fázisszerkezetű. Ezáltal a bonyolult szálképzést el lehet kerülni, továbbá a PCL kristályosodásával történő alakrögzítés jósága 80%-ra növekedett.

5. Tézisek

Kísérleti eredményeim alapján az alábbi téziseket fogalmaztam meg.

1. Kimutattam, hogy üvegszövettel, szénszövettel, vagy unidirekcionális szénszállal erősített alakemlékező epoxigyanta kompozitok visszaalakulási hajlítófeszültségeik az elérhető legnagyobb (1...1,6%) deformációk esetén egy-két nagyságrenddel nagyobbak, mint az erősítetlen epoxigyantáké, miközben a visszaalakulási képesség nem csökken 98% alá. A magas visszaalakulási arány annak köszönhető, hogy a károsodáshoz vezető, irreverzibilis változások elhanyagolható mértékűek, amennyiben a deformáció a lineárisan viszkoelasztikus tartományon belül marad. Ekkor a visszaalakulási feszültség közel azonos az alakadási feszültséggel [1, 5, 7, 8, 9].
2. Dinamikus mechanikai analízissel kimutattam, hogy a növényi erősítőszálak aminos térhálósítás esetén 6-12°C-kal, anhidrides térhálósítás esetén akár 18-30°C-kal is csökkenthetik az epoxigyanta mátrix üveges átmeneti hőmérsékletét (T_g). Anhidrides térhálósításnál azért nagyobb a T_g csökkenésének mértéke, mert az anhidrid képes kémiai reakcióba lépni egyrészt a növényi szállal bevitt maradék (szárítás után megmaradó) vízmolekulákkal, másrészt a növényi rostok funkciós csoportjaival. A szükségesnél kevesebb mennyiségű anhidrid tökéletlen térháló kialakulását, így a T_g csökkenését eredményezi. Ezzel szemben az aminos térhálósításnál csak a vízmolekulák fizikai lágyító hatása érvényesül [2, 6, 10].
3. Kimutattam, hogy szénszövettel erősített alakemlékező epoxigyanta mátrixú kompozitok hárompontos hajlítása esetén az erősítés miatti alakrögzítési tényező-csökkenés kompenzálható azzal, ha az erősítőanyag aszimmetrikusan túlnyomórészt a húzott oldalon helyezkedik el. Igazoltam, hogy az aszimmetrikus erősítés az eltérő hőtágulási együtthatók miatt

hőmérséklet-változtatáskor elhajlást okoz, amely hatás a hajlító igénybevételű alakemlékező effektushoz hozzáadódik, ha az erősítőanyag a húzott oldalon helyezkedik el, és kivonódik, ha az erősítőanyag a nyomott oldalon helyezkedik el [3, 9].

4. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokkal igazoltam, hogy elektro-szálképzett, 0,1-1 μm átmérőjű szálakat tartalmazó polikaprolakton (PCL) szálpaplan vákuummal segített gyantainfúziós technikával történő epoxigyantába ágyazásakor az impregnálás javítható, ha a PCL szálpaplan grafént is tartalmaz. Kimutattam, hogy a szálképzés során a PCL szálak közé került grafén mintegy távtartóként funkcionál, így az epoxigyanta jobban a szálak közé tud jutni [4, 10].

5. Bebizonyítottam, hogy *in-situ* is elő lehet állítani két alakra emlékező epoxigyanta (EP)/ polikaprolakton (PCL) anyagársítást úgy, hogy az epoxi komponens a benne oldott PCL olvadék jelenlétében a hozzáadott diaminnal fázisszétválást eredményezve térhálósodik. Az így előállított 23 m% PCL tartalmú *in-situ* EP/PCL alakrögztési (81-95%) és visszaalakulási (85-94%) képességeiben hasonló az ugyanannyi PCL-t tartalmazó, elektro-szálképzéssel és impregnálással előállítható EP/PCL szálpaplan alakemlékezési képességeihez, amelyek rendre 67-95% és 89-96% [4, 10].

6. Saját közlemények jegyzéke

Idegen nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- [1] Fejős M., Romhány G., Karger-Kocsis J.: Shape memory characteristics of woven glass fibre fabric reinforced epoxy composite in flexure. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31, 1532-1537 (2012).
(IF: 0,902)
- [2] Fejős M., Grishchuk S., Karger-Kocsis J.: Effects of fibre content and textile structure on dynamic-mechanical and shape-memory properties of ELO/flax biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32, 1879-1886 (2013).
IF: 1,188
- [3] Fejős M., Karger-Kocsis J.: Shape memory performance of asymmetrically reinforced epoxy/carbon fibre fabric composites in flexure. *Express Polymer Letters*, 7, 528–534 (2013).
IF: 2,953
- [4] Fejős M., Molnár K., Karger-Kocsis J.: Epoxy/polycaprolactone systems with triple-shape memory effect: electrospun nanoweb with and without graphene versus co-continuous morphology. *Materials*, 6, 4489-4504 (2013).
IF: 1,879

Magyar nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- [5] Kajtár M., Fejős M.: Alakemlékező epoxigyanta alapú kompozitok csavaró igénybevételű vizsgálata. *Polimerek*, nyomdában.
- [6] Fejős M., Szolnoki B.: Szorbit poliglicidil éter alapú bioepoxigyanta és abból készült természetes szöveterősítésű biokompozitok mechanikai és dinamikus mechanikai tulajdonságai. *Műanyag és Gumi*, 50, 449-453 (2013).

Konferenciacikkek és előadások

- [7] Fejős M., Karger-Kocsis J.: Gyanták alakemlékező képessége és alkalmazási lehetőségei. Erősített Műanyagok 2012 Nemzetközi Balaton Konferencia, Keszthely, 20120522_1440 (2012).
- [8] Fejős M., Karger-Kocsis J.: Epoxy based shape memory polymer composites with different textile reinforcement. 4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems, Montecatini Terme (Italy), A15:P80 (2012).
- [9] Karger-Kocsis J., Fejős M.: Shape memory performance of epoxy resin-based composites. 16th European Conference on Composite Materials, Seville (Spain), 23.4.1-R12 (2014).
- [10] Fejős M., Karger-Kocsis J.: The role of biobased polymers in shape memory epoxy composites. International conference on Bio-Friendly Polymers and polymer additives (BPPA14): from Scientific Aspects to Processing and Application, Budapest, P40 (2014).