

Polimer kompozitok - áttekintés

Czigány T., Izer A., Tábi T.

Accepted for publication in Műanyag és Gumi

Published in 2007

DOI:

# Polimer kompozitok – áttekintés

DR. CZIGÁNY TIBOR\*

tanszékvezető egyetemi tanár  
az Erősített Műanyaggyártók Szövetségének elnöke

IZER ANDRÁS\*

PhD hallgató

TÁBI TAMÁS\*

PhD hallgató

## 1. Bevezetés

A korszerű műszaki anyagtudomány három alapvető csoportra, a fémek, a polimerek és a kerámiák anyagcsaládjára épül [1]. Ezek önmagukkal, illetve egymással kombinált, társított rendszerei a kompozitok, amelyek egyesítik az összetevők előnyös tulajdonságait. A kompozitok olyan többfázisú, összetett szerkezeti anyagok, amelyekben a nagyszilárdságú erősítőanyag és a szívós mátrix között erős adhéziós kapcsolat van [2]. A kompozitok alkalmazásával olyan tulajdonságok is elérhetőek, amelyekkel a komponensek külön-külön nem rendelkeznek. Ilyen szerkezeti anyag pl. a vasbeton, az acélradial gumiabroncs vagy az üvegszál erősítésű polimer kompozit is. A polimer kompozitok további előnye a kis sűrűség, a fajlagosan nagy szilárdság, a korrózióállóság, az elektromos és mágneses szigetelő képesség, az előre tervezhető anizotrópia stb. [3]. Ez a nagyfokú mérnöki szabadság teszi lehetővé, hogy a polimer kompozitokból szélsőséges mérettartományú termékek is készíthetők, akár 1 milliméter átmérőjű fogaskerék, vagy akár 100 méter hosszú szélerőmű lapát (1. ábra).

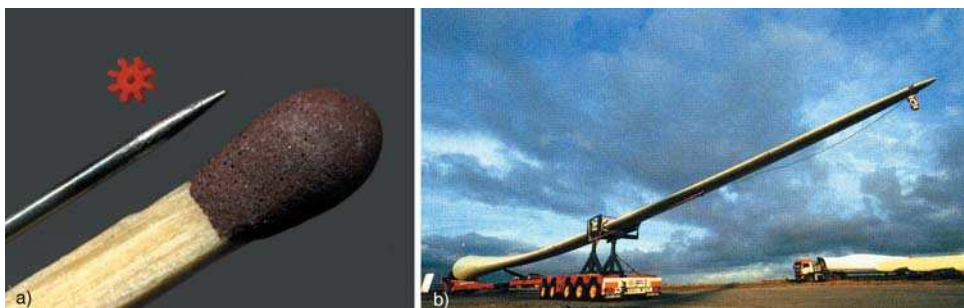
A mai korszerű technika és piacorientált gazdaság jellemző vonása a polimer kompozitok nagy tömegű és egyre növekvő mértékű felhasználása az ipar minden területén, ami elsősorban a kedvező ár/tömeg hányadossal magyarázható. Ez megnyilvánul többek között az exponenciálisan növekvő járműipari alkalmazásokban is, hi-

szen mind a légi, mind a vízi, mind a szárazföldi közlekedésben teret hódítanak, ahol a hagyományos fém szerkezeti anyagok mellett folyamatosan jelennek meg a korrózióálló polimer kompozitok. Használatuk jelentős tömegcsökkenéssel jár, ami üzemanyag megtakarítást és egyben környezeti terhelés csökkenést eredményez [4]. Ennek az exponenciális növekedésnek a hátterében egyrészt az új kompozit anyagok, a különleges tulajdonságú mátrixok és erősítőanyagok, másrészt az egyre fejlődő technológiák állnak. Nem valósulhatott volna meg az AIRBUS gigantikus fejlesztése kompozit anyagok és továbbfejlesztett technológiák (RTM, SMC, Autokláv stb.) nélkül. Az A380-as repülőgép 73 m hosszú, 24 m magas, 80 m szárny-fesztávmeretű, akár 1000 utast is képes szállítani (több emeletes, az emeletek közötti közlekedés mozgólépcsővel és liftekkel történik), „mindössze” 500 t tömegű. Ez az óriásgép, amelynek több tucat példánya napjainkban kezdi meg menetrendszerinti útjait, nem tudna a levegőbe felemelkedni, ha a felhasznált anyagok jelentős része nem kompozit lenne.

Jelen cikk célja röviden áttekinteni a polimer mátrixú kompozitok napjainkban jellemző anyagait és alkalmazási területeit.

## 2. Kompozitok jellemző mátrixanyagai, hibridmátrixú kompozitok

Polimer kompozitokon néhány évvel ezelőtt még elsősorban hőre keményedő mátrixú (pl. poliészter, epoxi, vinilészter) kompozitokat értettek a szakemberek, addig napjainkban a hőre lágyulóak (pl. PP, PA, PEEK) sokkal elterjedtebbek. Köszönhető ez a gyors és nagy termelékenységgel hőre lágyuló technikáknak, mint a



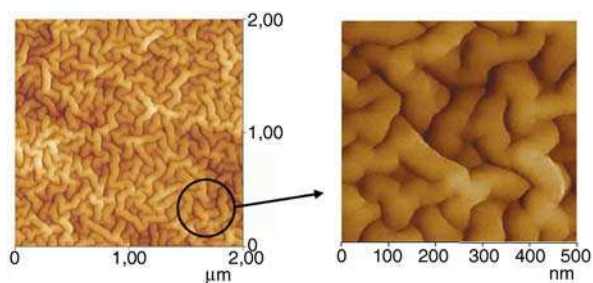
1. ábra. Kis és nagyméretű termékek polimer kompozitból

a – üvegszálal erősített PA fogaskerék

b – üveg és szénszál erősítésű, epoxi gyanta mátrixú, laminálással gyártott szélerőmű lapát

\*BME Polimertechnika Tanszék

fröccsöntés vagy az extrudálás, illetve a nagy méretű termékek gyártását lehetővé tevő korszerű hőformázási eljárásoknak. A hagyományos „mono” mátrixok mellett, mindinkább teret nyerne az ún. hibrid mátrixú kompozitok is, ahol egy kompoziton belül több mátrix hibridizációja biztosít különleges, az egyes mátrixoktól eltérő tulajdonságokat [5]. Ilyen pl. a vinilészter/epoxi (VE/EP) hibridgyanta, amelynek alkalmazását indokolja, hogy a VE gyantát kedvezőbb mechanikai és vegyszerállósági jellemzői révén előnyben részesítik a telítetlen poliésztergyantával szemben. A VE/EP gyantakombináció alkalmazását, kiváló tulajdonságai mellett, a szálak felületkezelésének szükségessége is alátámasztja. Az EP gyanta kiváló összeférhetősége többféle mátrixszal a szakirodalomban közismert, így nem véletlen, hogy a kereskedelemben az epoxigyantával felületkezelt szálak jól bevezetett termékek (pl. üvegszál, szénszál). Ugyanakkor ez nem mondható el a VE vonatkozásában, ahol a gyanta-szál közötti adhézió csak nehezen oldható meg. Így egy EP felületkezelésű szál bevitelére a VE/EP gyantába a felületi tapadás biztosítása szempontjából igen előnyös és hatásos lehet a VE/EP gyanták speciális morfológiája folytán. Atomerőtér mikroszkópos (AFM) felvételek révén bizonyítást nyert, hogy ezek a gyanták egymásba hatoló hálószerkezettel (interpenetrating network, IPN) rendelkeznek [6]. A szimultán térhálósodó VE és EP gyanták „önrendeződése” (térhálósodásuk során bekövetkező fázissztérválás) nanométer skálájú „finomszerkezetet” eredményez (2. ábra), amellyel igen szívós, ütésálló anyag jön létre.



2. ábra. VE/EP hibridgyanta IPN szerkezete atomerő mikroszkópos felvételen [6]

Megfelelő szálkezeléssel (VE-hez vagy EP-hez kezelve a szálakat) kivitelezhető, hogy azok az IPN struktúra megfelelő részéhez tapadva biztosítsák az ismétlődő kapcsolódást. Az elgondolás nagy előnye, hogy az IPN szerkezet eredményeként a szál/mátrix kötődés struktúrája nanotartományban (kb. 50–200 nm) váltakozik, amely figyelembevételével a kritikus szálhosszat (kb. 100  $\mu\text{m}$ -tól felfelé), a „kötés-nem kötés elemi egység” többszörösen ismétlődhet.

### 3. Kompozitok jellemző erősítőanyagai és azok formái

A polimer kompozitok erősítőanyagának alakja jellemzően henger vagy lemez, hiszen ez a két geometria az, amely biztosítja a térfogathoz képest legnagyobb felületet, amely szükséges a megfelelő határfelületi adhézió, együttdolgozás eléréséhez. Az előzőt nevezzük a szálerősítésű-, míg az utóbbit a nanokompozitoknak.

#### 3.1. Mesterséges szálerősítésű rendszerek

Az erősítőszálakat anyaguk szerint két fő csoportba sorolhatjuk: mesterséges és természetes szálakra [7]. A mesterséges szálak lehetnek szerves és szervetlen alapúak. A szerves alapú mesterséges szálak csoportjába tartoznak a poliamidok (aramid), a poliészterek, mint a poli(etilén-tereftalát), a poli(akril-nitrilek), a poliolefinok, mint a polietilén, a polipropilén stb. és a poliimidek. Ezek közül a legelterjedtebb polimer erősítőanyag az aramid, melynek kiváló tulajdonsága a nagy szilárdság, a jó hőstabilitás, a vegyszerállóság és a nagy energiaelnyelő képesség. Hátránya, hogy a többi szerves szálhoz hasonlóan UV sugárzás hatására degradálódik. Leggyakrabban különböző dörzsbetétek és gumibroncsok, sporteszközök, továbbá ballisztikai védelemre szolgáló termékek (polimer mátrixú golyóálló mellények, sisakok és páncélozott járművek) erősítőanyagaként használják fel [8].

A szervetlen alapú mesterséges szálak csoportjába tartoznak az üveg-, kerámia-, bazalt-, alumíniumoxid-stb. szálak. Ezek közül a legjelentősebb az üvegszál, amely a polimer kompozitok erősítőanyagának döntő többségét adja (alkalmazása már közel száz éves múltra tekint vissza). Az üveg jellemzője, hogy izotróp és amorf, fő alkotóeleme a szilíciumdioxid, de többféle fénoxidot is tartalmazhat, ami megváltoztatja tulajdonságait. Polimerek erősítésére elsősorban E-üveget alkalmaznak, amely a  $\text{SiO}_2$ -n kívül  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  és  $\text{Na}_2\text{O}$ -ot tartalmaz nagyobb százalékban. Legfontosabb tulajdonságai: nagy szilárdság, nagy hőállóság, éghetetlenség, jó vegyszerállóság, biológiai stabilitás. Tekintettel nagyarányú felhasználására, szinte az élet minden területén megtalálhatók az üvegszál erősítésű polimer kompozitok, pl. gépjárművek, hajók, sporteszközök, különféle burkolatok stb.

Új erősítőanyag a bazaltszál, amely vulkanikus eredetű felszíni kőzet (átlagosan 40–60%  $\text{SiO}_2$  tartalmú), a belőle készült szálak számos kiváló tulajdonsággal rendelkeznek. Nagy rugalmassági modulusza és kiváló hőállósága mellett a szál hő- és hangszigetelő képessége és rezgéscsillapító tulajdonsága is kiemelkedő, valamint figyelemre méltó biológiai stabilitása és vegyszerállósága. Jellemzően kétféle technológiával gyártják. Az ún.

Junkers féle, centrifugálhengeres szálazásos technológiával az olcsó, 60–100 mm hosszú, 8–10  $\mu\text{m}$  átmérőjű szálakat gyártják, amelyek elsődleges alkalmazása az építő- és a járműipari szigetelőanyagok. Az igényesebb, textilipari eljárásokkal kiválóan szőhető, fonható szálát az üvegszál gyártásával megegyező szálhúzásos technológiával állítják elő. Ezek a 10–12  $\mu\text{m}$  átmérőjű, végtelen szálak különböző elemiszál tartalmú rovingokban kaphatók, szilárdsági tulajdonságaik valamivel jobbak, mint az üvegszálaké, áruk viszont még 10–20%-al magasabb. Ez azonban a következő években megváltozik az igények növekedésével és a gyártókapacitások jelenlegi bővülésével. Ezeket a nagyon jó minőségű szálakat elkezdték alkalmazni mind hőre lágyuló, mind hőre keményedő mátrixú kompozit termékeknek, pl. sporteszközök, pultrudált termékek, szélkerekek, hőformázott panelek stb. (3. ábra). Így előrevetíthető, hogy a bazaltszál a bőr-irritáló tulajdonságokkal rendelkező üvegszálak, valamint a betiltott, rákkeltő azbesztszálaknak lehet a jövőben alternatívája nemcsak a kiváló tulajdonságainak, hanem a csökkenő árának is köszönhetően [9].



3. ábra. Bazaltszál erősíté-  
sű állvány (Gitzo®)

legi bővülésével. Ezeket a nagyon jó minőségű szálakat elkezdték alkalmazni mind hőre lágyuló, mind hőre keményedő mátrixú kompozit termékeknek, pl. sporteszközök, pultrudált termékek, szélkerekek, hőformázott panelek stb. (3. ábra). Így előrevetíthető, hogy a bazaltszál a bőr-irritáló tulajdonságokkal rendelkező üvegszálak, valamint a betiltott, rákkeltő azbesztszálaknak lehet a jövőben alternatívája nem-

csak a kiváló tulajdonságainak, hanem a csökkenő árának is köszönhetően [9].  
A szénszál különleges helyet foglal el az erősítőszálak sorában, mivel szénvázas, mint a mesterséges és természetes polimerek többsége, de azoktól eltérően a grafit különleges kristályszerkezetével rendelkezik. A szénszálak alkalmazása valójában nem új. Közismert, hogy az elektromos izzólámpákban alkalmazott szénszálak gyártására már Edison szabadalmaztatott egy eljárást, amely cellulózszálak karbonizálásán alapult. Ezek a szálak azonban nagyon törekenyek voltak, így a mechanikai igénybevételeknek nem álltak ellen. A mai értelemben vett szénszálakat a közhiedelemmel ellentétben nem a természetben előforduló grafitból, hanem kátrányból, vagy még gyakrabban poliakrilnitril (PAN) szálból, mindkét esetben pirolitikus úton, állítják elő. A PAN szálát ez esetben prekurzornak (előgyártmány) nevezik. A szénszál polimer kompozitokhoz való alkalmazását az az igény indította el, hogy az üvegszálnál nagyobb modulusú erősítőszálra volt szüksége az USA katonai repülőgépiparának. Kifejlesztését az 1950-es évek végétől jegyzi a szakirodalom. Azóta a szénszál és a szénszál erősítésű polimer kompozitok igen bőséges szakirodalommal rendelkeznek [10]. A szénszál erősítésű polimerek előnye a nagy szilárdság és a különösen nagy merev-

ség mellett többek között a kis sűrűség és a jó csillapító-képesség. Ezek a tulajdonságok elsősorban a repülőgépgyártásban fontosak, de a hétköznapi felhasználásuk is kezd teret nyerni főként a sporteszközök területén (golf- és teniszütők, horgászbotok, evezőlápátok, sílécek stb.), valamint az energiaiparban hőre keményedő mátrixú szélkerekek erősítőanyagaként. A szénszálak további elterjedésének leginkább magas áruk szabott határt, azonban napjainkban egyre többet és egyre olcsóbban állítanak elő, amiben a Nyergesújfalun működő ZOLTEK RT-nek is jelentős szerepe van.

### 3.2. Természetes szál- és rosterősítésű rendszerek

Természetes szálaknak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek szál formában található meg a természetben. Ezek lehetnek növényi, állati vagy ásványi eredetűek. A növényi eredetű, természetes szálakat tovább osztályozhatjuk magszálak, hánccsrostok és keményrostok szerint (a rostok elemi szálakból felépülő szálkötegek). A legelterjedtebb növényi magszál a pamut. Hánccsrostoknak nevezzük, azokat a szálakat, amelyek növények száraiban találhatóak és áztatás során mikroorganizmusok (baktériumok, gombák) segítségével tárható fel. Finomabb hánccsrost a len és a kender, míg durvább a juta. A kemény rostok a növények leveleiben vagy gyümölcssejtek kérgében fordulnak elő. Levélrostnak nevezzük például az agavék levelében előforduló szizált, gyümölcszálaknak a kókuszrostot. A természetes növényi szálak a feldolgozási eljárástól függetlenül viszonylag jó formátartók, ezért alkalmasak termelékeny műanyag-feldolgozó eljárásokban (pl. fröccsöntés, extrudálás) való felhasználásra. Előnyük az üvegszálhoz képest, hogy éghetőek, így az üvegszál erősítésű rendszerekkel szemben a természetes szállal erősített polimer kompozitok termikus úton megsemmisíthetők. A megsemmisítés másik módja talán még egyszerűbb, noha időigényesebb: a természetes polimer szálát a mikroorganizmusok lebontják. Ez persze csak akkor működhet, ha a mátrix is biológiailag lebomló anyag, illetve ha előtte kiválasztottuk a szálakat a mátrixtól. Merevség és szilárdság tekintetében a növényi szálak nem érik el az üvegszál jellemzőit, de ha ezeket a tulajdonságokat a sűrűsége vonatkoztatjuk, a különbség már nem jelentős. Növényi szálakat polimer mátrixba „beépítve” annak mechanikai tulajdonságai javíthatók (pl. ütésállóság) anélkül, hogy sűrűsége számottevően változna (a növényi szálak sűrűsége kb. fele az üvegszálénak). A növényi szállal erősített polimerek feldolgozhatók extrudálással (pl. ablakprofilok), fröccsöntéssel (pl. burkolatok, gépjárművek műszerfala) és sajtolással (pl. karosszéria elemek, villamossági alkatrészek) [11].

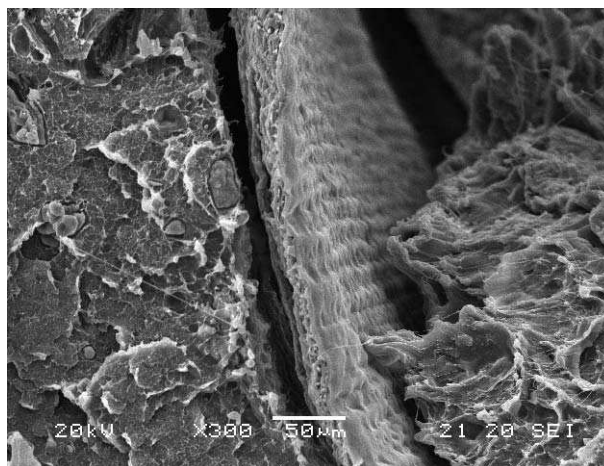
Az állati eredetű szálak csoportjába sorolhatók a szőrök és a mirigyváladékok. A legelterjedtebb állati szőrök

a gyapjú, a kecskeszőr, a nyúlászőr, a teveszőr, a lámaszőr stb. A mirigyvádások közül a legismertebb a hernyó- és a pókselyem. A szakirodalomban található ugyan utalások az állati eredetű szőrök polimer mátrixba való ágyazásáról [12], ezek a kísérletek azonban nem vezettek hasznosítható eredményre, tekintettel ezen szálak gyengébb mechanikai tulajdonságaira, hőérzékenységre, rossz határfelületi kötődésére és nem utolsósorban rendkívül magas ára.

Az ásványi eredetű szálak csoportjába tartozik az azbeszt, amely olyan kalcium-magnézium-szilikát ásvány, amely a természetben kötegek, szálszerű kristályok formájában fordul elő. Az azbeszt 1000°C-ig hőálló, saválló és húzószilárdsága is megfelelő. Ezért sokáig használták az építőiparban a cement alapú kompozitokhoz, valamint a gépjárműiparban különböző polimer mátrixú dörzsbetétek (tengelykapcsoló-tárcsák, fékbetétek stb.) erősítőanyagaként, sőt úrhajók hővédő pajszaik és fékező lapjainak alkotóanyagaként is [13]. Felismerték azonban, hogy az azbesztszálak kopásakor finom száldarabok, tűszerű kristályok jutnak a levegőbe, amelyek az emberi szervezetbe kerülve rákos megbetegedéseket okozhatnak, ezért ma már a világon szinte mindenütt betiltották az azbesztszál alkalmazását.

A természetes eredetű szálak alkalmazhatósága mellett egyre nagyobb figyelmet kapnak a farostok, valamint a mezőgazdasági melléktermékek (pl. kukoricamaghéj, búzakarpa) polimerekben való alkalmazhatósága is. Ennek oka, a környezetvédelmi előírások mellett, azok alacsony árban (kilogrammonkénti áruk 5–10-szer kisebb, mint a legolcsóbb polimeré) és nagy mennyiségű keletkezésükben keresendő. A farostokat már a 70-es években is próbálták alkalmazni polimerek erősítőanyagaként több-kevesebb sikerrel, azonban az igazi elterjedése a technológiai gépek fejlődésével a 90-es évek végén indult meg. A modern fröccsöntő és extrudáló gépekkel akár 70–80%-os rosttartalmú termékeket is lehet gyártani, amelyeket ma már nagy mennyiségben alkalmaz pl. az építőipar és az autógyártás is [14].

A kukoricamag mellékterméke a maghéj, amelynek felhasználása ma még nem megoldott. Kezdeti próbálkozások történtek biomasszaként, etilalkohol előállítására, valamint biobrikett gyártásához. Bár mindkét alkalmazási kísérlet hozott eredményeket, a kihozatali és gazdaságossági hatások rendkívül alacsony volt. Igen biztató viszont a fröccsöntött technológiával való polimer termékek gyártása, mivel a kukoricamaghéj alkalmas polimerek töltésére, tekintettel arra, hogy a merevséget és a gyárthatóságot javítják, a zsugorodást és a deformációt pedig csökkentik. Hátránya, hogy a maghéj és a polimer mátrix közötti megfelelő határfelületi adhézió kialakítása igen nehézkes (4. ábra), azonban ezt megfelelő adalékanyagokkal javítani lehet [15].



4. ábra. Kukoricamaghéjjal töltött PE töretfelületről készült SEM felvétel

### 3.3. Önerősítésű kompozitok

Az önerősítéses (self reinforced) polimer kompozitok olyan szerkezeti anyagok, amelynél mind a mátrix, mind a nagyszilárdságú (orientált) erősítőszál azonos, de különböző olvadáspontú hőre lágyuló polimerből áll. Ez biztosítja a teljes újrafeldolgozhatóságot. Az önerősítésű kompozitokra három feldolgozási technológiát dolgoztak ki. A kompaktálásos technika lényege, hogy a terhelés alatt lévő polimer szál felülete és magja különbözőképp viselkedik, a hőmérséklet emelkedésével először a felület, majd fokozatosan a keresztmetszet egyre nagyobb hányada is megolvad a szál közepe felé. A fejlesztés legfőbb célja, meghatározni azt a feldolgozási hőmérsékletet, amelynél a szál felülete olyan mértékben megolvad, hogy az ömledék már képes legyen egy összefüggő mátrixot alkotni a lehetséges maximális szál-tartalom megtartása mellett. Önerősítésű PP kompozit lemezek és a belőlük készült termékek már kereskedelemben is kaphatók Curv® márkanéven (5. ábra). Az eljárás előnye a teljesen homogén, folytonos mátrix és az egyszerű újrahasznosítás, hátránya, hogy előállításához



5. ábra. Önerősítésű PP golyóálló mellény (Curv®)

precíz technológiai háttérre van szükség, mivel a feldolgozási tartomány csupán néhány °C.

A másik jellemző technológia a koextrudálásos eljárás, amelynek lényege, hogy a mátrix (általában PP) anyagát ráextrudálják az erősítőanyag magra, majd jelentős nyújtásnak teszik ki, amellyel kialakítják a szál nagy szilárdságát. Hasonló előnyökkel jellemezhető, mint a kompaktálásos technológiával előállított kompozit, de ebben az esetben a feldolgozási tartomány sokkal szélesebb (20–25°C). E típusú kompozitok a kereskedelemben *Pure*<sup>®</sup> márkanéven kaphatók. A harmadik, a film-stacking eljárás során a mátrix anyagból fóliát extrudálnak, majd az erősítőstruktúrát (szövet, kártolt paplan, kötött kelme) és a mátrix fóliát egymásra rétegezve előre felfűtött présbe helyezik, összepréselik és lehűtik. A megfelelő olvadási hőmérséklet különbség a mátrix anyag módosításával (random kopolimer,  $\beta$  kristálymódosulat) érhető el [16].

### 3.4. Biokompozitok

A fogyatkozó kőolajkészletek és a műanyag termékek újrahasznosításra irányuló erőteljes törekvések egyre inkább elősegítik a biokompozitok elterjedését. A biokompozit alatt biodegradábilis, azaz biológiai úton (baktériumok, gombák, algák által), a földben komposztálva természetes anyagokra teljesen lebomló és a földet, illetve a földben élő flórát és faunát nem veszélyeztető anyagot értünk. A biokompozitok mátrixanyagai a biopolimerek, amelyeket két fő csoportba lehet sorolni aszerint, hogy kőolaj alapúak vagy valamilyen természetes erőforrás szolgál alapanyagukként (biomassza). A kőolaj alapú biopolimerek között találjuk pl. az orvosi célokot szolgáló polikaprolaktont (PCL), a mezőgazdasági fóliák lebomló anyagát a poli(észter-amidot) (PEA), illetve az alifás- és aromás kopolisztereket (PBSA, PBAT). Hátrányuk, hogy kőolajból gyártják ezeket, illetve az előállítási költségük magas. Mechanikai tulajdonságaik a PE és a PP között helyezkednek el. A biomasszából előállított biopolimerek közé tartozik többek között a két, a jövőt tekintve leginkább ígéretes biopolimer, a politejsav (PLA) és a termoplasztikus keményítő (TPS). TPS-t a növényekből kinyert keményítőtől, míg PLA-t a keményítő erjesztésével lehet előállítani. Széleskörűen rendelkezésre áll, megtalálható számos kultúrnövényben, köztük a búzában, a kukoricában, a burgonyában és a rizsben is. Biokompozitról akkor beszélhetünk, ha olyan erősítőanyaggal társítjuk a biopolimert, amely szintén lebomló [17]. Ezek az erősítőanyagok a már említett cellulóz alapú természetes szálak és rostok, mint pl. a len, kender, sisal, rami, farost stb., amelyekkel a biopolimerek kiválóan összeférnek kémiaiilag hasonló felépítésüknek köszönhetően. A PLA jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a TPS, sőt természe-

tes szálakkal társítva jelentős tulajdonságjavulás érhető el, ami akár a „klasszikus” poliészter/ üvegszál kompozitok kiváltására is alkalmassá teheti. A TPS nagy előnye, hogy gyors a lebomlási folyamata, ugyanakkor egyes tulajdonságai további javításra szorulnak. Habár kiválóan fröccsenhető, a műszaki műanyagokhoz képest nagy a zsugorodása, érzékeny a nedvességre és idővel jelentősen ridegedik. Ezeket a gyenge pontokat csökkenteni lehet szál erősítéssel vagy más biopolimerekkel való társítással. A kutatások eredményeképpen valószínűsíthető, hogy a jövőben ezek a biopolimerek lesznek a fenntartható fejlődést, a környezeti forrásokkal való tudatos gazdálkodást támogató és segítő biokompozitok mátrixanyagai.

Az orvostechikában a lebomló biopolimerek és biokompozitok mellett azon polimereket és kompozitokat is „bio”-nak nevezik, amelyek bár nem szükségszerűen lebomlóak, de az emberi szervezettel kölcsönhatásba kerülnek. Ilyenek pl. az implantátumok, a protézisek, a mesterséges szervek (szívbillentyű, csípő és térd ízület), a fogászati implantátumok, külső és belső törésrögzítők, szemlencsék stb. (6. ábra) [18]. Az orvostechikai biokompozitok egy része, amellyel, hogy szervezetbarát, a testnedvek általi programozott felszívódásával is elősegítheti a gyorsabb gyógyulást (pl. felszívódó törésrögzítők, amelyek alkalmazásával nincs szükség második, a rögzítőelemet eltávolító műtétre) [19]. Ilyen az önerősítésű politejsav is [20].



6. ábra. Biokompozit művégtag [18]

### 3.5. Nanokompozitok

Amíg az eddig bemutatott szál- és rosterősítésű rendszerek erősítőanyagainak tipikus átmérője 5–100  $\mu\text{m}$  nagyságrendű, addig a nanokompozitok erősítőanyagai olyan korongok vagy csövek, amelyek vastagsága, illetve átmérője jellemzően 1–10 nm nagyságú. A polimer mátrixú nanokompozitokban először rétegszilikátokat használtak (pl. montmorillonit), amellyel sikerült a mátrixok egyes tulajdonságain javítani. Ezeknek az olcsón beszerezhető, természetben előforduló agyagásványoknak a mátrixban való egyenletes eloszlása a mai napig

sok gonddal jár, de számos kutatócsoport sikereket ért ezen a téren [21, 22]. E nanokompozitok jól alkalmazhatók a csomagolóiparban, ahol a csomagolófóliák légáteresztő képességét csökkentik. A nanokompozitok fejlesztésének új irányt adott az alig tíz éve felfedezett szén nanocső megjelenése. A szén nanocső tökéletes hengerre tekert egyetlen atomvastagságú grafitréteg, amely lehet egyfalú, illetve többfalú. A nanocsövek szakítószilárdsága átlagosan 50 GPa, vagyis kb. 100-szorosa az acélnek és sűrűsége is kisebb, mint az acélé. Nagyobb mennyiségű előállítására egyrészt szén elektródákból elektromos ívkisülés révén plazmatechnológiával, másrészt szénhidrogének gázfázisú katalitikus bontásával lehetséges [23]. A szén nanocsövek geometriai méretük folytán (nanométeres átmérő, mikrométeres hossz) hasonló arányokkal rendelkeznek, mint a hagyományos erősítőszálak (mikrométeres átmérő, milliméteres hossz). Így erősítőanyagként való alkalmazásuk polimer mátrixú kompozitokhoz a nagy felület/ térfogat arány következtében jó lehetőségnek tűnik. Ezt felismerve számos kutatóintézet kezdett a témával foglalkozni és a korong alakú nanoszilikát erősítés analógiájára elsősorban hőre lágyuló mátrixokhoz (PA, PP) alkalmazták. A problémát azonban itt is az okozta, hogy az anyagban a nanocsöveket nem tudták megfelelően diszpergálni, így azok összefüggő aggregátumot alkotva hatalmas, néha milliméteres nagyságú hibahelyeket hoztak létre. Ezért az utóbbi időben egyre több kutató fordul a hőre keményedő mátrixok irányába abban bízva, hogy a kis viszkozitású mátrixban könnyebben lehet a nanoméretű, egymáshoz könnyen tapadó szén nanocsöveket eloszlatni [24].

Nem tesziünk kísérletet a polimer mátrixú nanokompozitok részletesebb bemutatására, amelynek oka, hogy irodalma rendkívül szerteágazó és bőséges. Ma az egyik legnépszerűbb és legkutatottabb tudományterület, amit bizonyít, hogy 2007 első három hónapjában csak a nanokompozitokról, és csak az SCI-ben több, mint 150 tudományos publikáció jelent meg! A *Google* keresőjébe beírva a *nanocomposite* kulcsszót 10 másodperc alatt 1 260 000 találatot ad. A nanotechnológia elsőbbséget élvez a világ összes országa kutatás-fejlesztés-innovációs terveinek összeállításánál, a pályázatok elbírálásánál is (pl. EU7), így mindent összevetve várható a gyakorlatban is a nagyobb térhódítása, robbanásszerű elterjedése.

#### 4. Polimer kompozitok alkalmazási területei

A polimer kompozitból készült szerkezetek, termékek alkalmazása közel egy évszázadra nyúlik vissza, gondoljunk csak a textil bakelitre. Az anyagok tulajdonságainak javulásával és a technológiák fejlődésével egyre nagyobb, egyre teherviselőbb, egyre speciálisabb tu-

lajdonságú szerkezetek készültek. Ismét példa, hogy 1944. június 6-án, a szövetséges csapatok a normandiai partraszállásnál már üvegszál erősítésű hajókat használtak, hogy a part menti, fémérzékeny aknáknak ellenálljanak. Azóta persze sokat változott a kompozittechnológia. Ma már természetes, hogy a hajók kompozitból készülnek, és nap mint nap láthatjuk az utcákon, hogy a közművek felújításánál tekerceselt, nem ritkán a kör keresztmetszettől eltérő csöveket használnak, járműveink kompozit karosszériásak, a világban járva pedig számos helyen találkozhatunk a szélfarmokkal, amelyek oszlopai és lapátjai is üveg/szénszál hibrídkompozitokból készülnek.

Egyre többet olvashatunk a hagyományos anyagokból készült termékek eddig elképzelhetetlenek hitt kompozitból való megvalósításáról, illetve sorozatgyártásáról. Ilyen pl. a MAZDA által kifejlesztett új, nagy szilárdságú, nagy törési szívósságú és hőállóságú motortéri biokompozitja, vagy a légrugók helyett elterjedő, a COMMERCIAL VEHICLE SYSTEMS által kifejlesztet kompozit rugófelfüggesztés teherautókhoz. Ma már nem meglepőek a SANKO TECHNO cég üvegszál epoxi alapanyagú kötőelemei (csavarok, anyák), melyek 0,1 mm pontosságúak. Ugyancsak terjednek az üvegszál kompozit és poliuretán hab szendvicsszerkezetből készült mobil házak, konténerek, barakkok, amelyek jól bírják az időjárás viszontagságait, ellenállnak mindenfajta támadásnak (kémiai, vegyi), és 4 ember által gyorsan összeszerelhetők. A DAIMLER CHRYSLER új, környezetbarát autóinak hidrogén tankját szénszál kompozitból készíti. A tartály akár 800 bar nyomást is elvisel, ami több mint kétszer akkora, mint a 350 bar-os üzemi nyomás. Száraz vidékeken, a víztározó ciszternákat újabban üvegszál műanyagból SMC technológiával készítik, amelyhez kémiaiilag semleges poliésztert alkalmaznak, ezáltal jobb vízminőség, nagyobb baktérium, ozmózis elleni ellenállás érhető el, mint a hagyományos ciszternáknál. A KUKA ROBOTICS CORPORATION legújabb közepkategóriás robotjának karjait szénszál kompozitból gyártják, amelynek terhelhetősége 40 kg. Brazíliában a fa oszlopok helyettesítésére készítenek újrahaznosított anyagokból (60% PP + 40% üvegszál) kompozit póznákat.

Sorolhatnánk hosszasan az új alkalmazásokat, amelyekről bővebben és naprakészen az internetről lehet információt gyűjteni (pl. [www.compositesworld.com](http://www.compositesworld.com)). És ha már az infokommunikációnál, a számítástechnikánál tartunk, érdekességképpen megemlíthetjük az ASUS új notebook-jainak (*EcoBook*) burkolatát, ami lebomló, különböző természetes szálerősítésű kompozitokból készül (*7. ábra*).



7. ábra. Asus EcoBook lebomló mátrixú természetes szálerősítéssű kompozitból [Asus®]

## 5. Összefoglalás

A szerkezeti anyagok piacán különösen gyors a műszaki fejlődés a polimer kompozitok területén. Amíg néhány évtizede ezeket az anyagokat főleg a hadiipar alkalmazta, addig ma már mindenki találkozhat az üvegszálalás kompozit horgászbottal, sporthajókkal, a szénszálalás síléccekkkel, teniszütőkkel, a gomba mód szaporodó szélkerekekkel vagy az autóiiparban és az orvostechikában alkalmazott nanokompozitokkal. Ez köszönhető mind az alapanyagok, mind a technológiák gyors fejlődésének, amely szinte minden nap új, a hagyományos szerkezeti anyagokat felváltó polimer kompozit anyagú termékekkel lep meg minket. Mindezek ellenére a polimer kompozitok szerkezeti anyagként való egyre gyakoribb alkalmazása és a környezettudatos, a kőolajjal takarékosan bánó szemlélet megköveteli a méretezési technikák fejlődését is [25], amelyek révén még könnyebb, még inkább az adott feladatra szabott (tailor made) kompozitok megjelenése várható.

*Az eredmények megjelenését az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA K61424, NI62729), valamint az NKTH Öveges József pályázatai támogatták.*

## Irodalomjegyzék

- [1] Ginsztler, J.; Hidasim B.; Dévényim L.: Alkalmazott anyagtudomány, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2002.
- [2] Czvikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Könyvkiadó, Budapest, 2000.
- [3] Friedrich, K.; Fakirov, S.; Zhang, Z.: Polymer composites, Springer Verlag, New York, 2005.
- [4] Czigány, T.; Czvikovszky, T.: Polimerek és kompozitjaik járműipari alkalmazása – áttekintés, Műanyag és Gumi, 43, 45–50 (2006).
- [5] Czigány, T.; Pölöskei, K.; Karger-Kocsis, J.: Fracture and failure behavior of basalt fiber mat-reinforced vinyl-ester/epoxy hybrid resins as a function of resin composition and fiber surface treatment, Journal of Materials Science, 40, 5609–5618 (2005).
- [6] Karger-Kocsis, J.; Gryshchuk, O.; Schmitt, S.: Vinyl-ester/epoxy-based thermosets of interpenetrating network structure: an atomic force microscopic study, Journal of Materials Science, 38, 413–420 (2003).
- [7] Bobeth, W.: Textile Faserstoffe, Springer Verlag, Berlin, 1993.
- [8] Panda, S. P.; Navale, N. G.; Saraf M. N.; Gupta, R. K.; Goel, R. A.: Ballistic applications of glass and Kevlar fiber vinylester composites, Defence Science Journal, 44, 341–343 (1994).
- [9] Czigány, T.: Trends in fiber reinforcement – the future belongs to basalt fiber, Express Polymer Letters, 1, 59 (2007).
- [10] Fitzer, E.: Carbon fiber and their composites, Springer Verlag, New York, 1985.
- [11] Bledzki, A. K.; Gassan, J.: Composites reinforced with cellulose based fibres, Progress in Polymer Science, 24, 221–274 (1999).
- [12] Hearle, J. W. S.: A critical review of the structural mechanics of wool and hair fibres, International Journal of Biological Macromolecules, 27, 123–138 (2000).
- [13] Pye, A. M.: A review of asbestos substitute materials in industrial applications, Journal of Hazardous Materials, 3, 125–147 (1979).
- [14] Czvikovszky, T.: Electron-beam processing of wood fiber reinforced polypropylene, Radiation Physics and Chemistry, 47, 425–430 (1996).
- [15] Dogossy, G.; Czigány, T.: Failure mode characterization in maize hull filled polyethylene composites by acoustic emission, Polymer Testing, 25, 353–357 (2006).
- [16] Hine, P. J.; Ward, I. M.: High stiffness and high impact strength polymer composites by hot compaction of oriented fibers and tapes, Polymer, 44, 117–1131 (2003).
- [17] Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T.: Natural fibers, biopolymers and biocomposites, CRC Press, Boca Raton, 2005.
- [18] Ramakrishna, S.; Mayer, J.; Wintermantel, E.; Leong, K. W.: Biomedical applications of polymer-composite materials: a review, Composites Science and Technology, 61, 1189–1224 (2001).
- [19] Marosi, Gy.; Marosfői, B.: Felületmódosítás a gyógyszer-technológiában, Műszaki Felülettudomány és orvosi biológiai alkalmazásai, szerkesztő: Bertóti, I.; Marosi, Gy.; Tóth, A. 219–239, B+V Könyvkiadó, Budapest, 2003 .
- [20] Vaccaro, A. R.; Singh, K.; Haid, R.; Kitchel, S.; Wuisman, P.; Taylor, W.; Branch, C.; Grafm S.: The use of bioabsorbable implants in the spine, The Spine Journal, 3, 227–237 (2003).
- [21] Pukánszky, B.: Interfaces and interphases in multicomponent materials: past, present, future, European Polymer Journal, 41, 645–662 (2005).
- [22] Marosfői, B.; Matkó, S.; Marosi, G.: Fire retarded polymer nanocomposites, Current Applied Physics, 6, 259–261 (2006).
- [23] Kónya, Z.; B. Nagy, J.; Kiricsi, I.: Szén nanocsövek előállítás és alkalmazásai, Magyar Tudomány, 164, 1114–1123 (2003).
- [24] Thostenson, E. T.; Ren, Z.; Chou, T. W.: Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: review, Composites Science and Technology, 61, 1899–1912 (2001).
- [25] Kollár, L. P.; Springer, G. S.: Mechanics of composite structures, Cambridge University Press, New York, 2003.