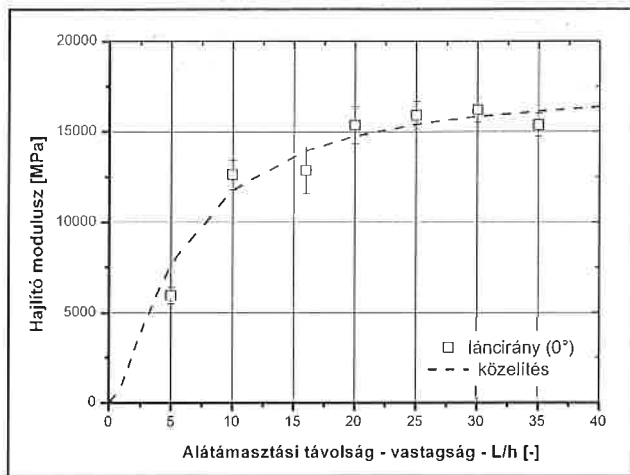


A 6. ábra szemlélteti a mért hajlító rugalmassági modulus lehetséges alakulását.



6. ábra. A lánccirányban mért modulus értékek kiterjesztése

Az illesztett összefüggés segítségével megbecsülhető az $x = L/h \rightarrow \infty$ esetre érvényes, aszimptotikus hajlító rugalmassági modulus értéke:

$$E_{B\infty} = \frac{1}{4b} \cdot \left(\frac{a_1}{b_2} \right)^3 = 18690 \text{ MPa}$$

Összefoglalás

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a kidolgozott gyártástechnológiával reprodukálhatóan megfelelő minőségű laminált kompozit próbatetek állíthatók elő. A vizsgált esetben a szabvány szerint számolt és korrigált hajlítószilárdság és hajlító rugalmassági modulus értékek jelentős változást mutatnak a támaszköz – próbatest vastagság viszony függvényében. A hajlító modulus változása jól leírható az illesztett törtfüggvénnyel, amivel a modulus aszimptotikus értéke is megbecsülhető.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben közölt eredmények az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA T049069) támogatásával és az Európai Unió társfinanszírozásával, az Európa Terv keretében (GVOP 3.1.1 – KOMPOZIT MÉRLEG) valósult meg.

Irodalom

- [1] Hodgkinson, J.M. (edited by): *Mechanical Testing of Advanced Fiber Composites*. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge (UK), 2000.
- [2] Kedward, K.T.: On the Short Beam Test Method. *Fibre Science and Technology* Vol. 5. (1972) 85-95.
- [3] Christiansen, A.W., Lilley, J., and Shortall, J.B.: A Three Point Bend Test for Fibre-reinforced Composites. *Fibre Science and Technology* Vol. 7. (1974) 1-13.
- [4] Jones, R.M.: Apparent Flexural Modulus and Strength of Multimodulus Materials. *J. Composite Materials*, Vol. 10. (Oct. 1976) 342-354.
- [5] Rácz Zs., Vas L.M.: Relationship Between Flexural Strength and Size Effects in Unidirectional Carbon/Epoxy, Composite Interfaces, Vol. 12, 325-339 (2005)

Az elektronkezelés hatása a PA6 mátrixú nanokompozitok szerkezetére és tulajdonságaira

Mészáros László* – Czikovszky Tibor*

Bevezetés

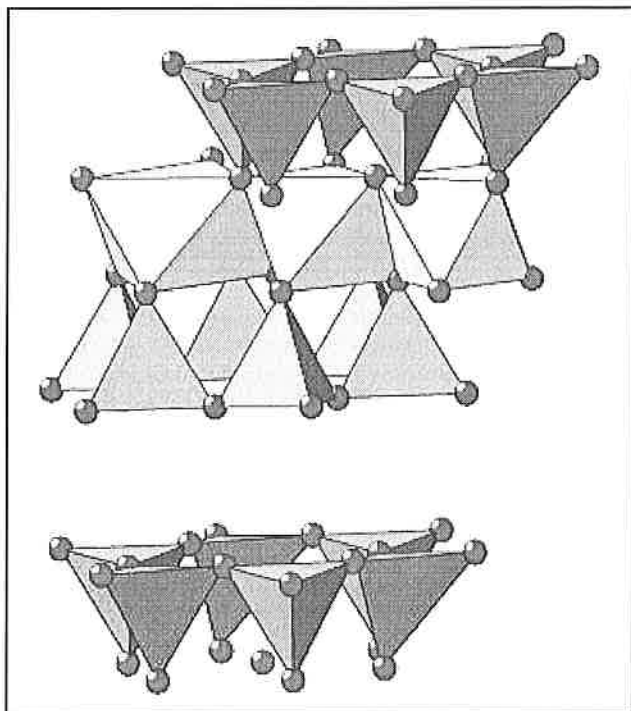
Az utóbbi évtizedekben a polimer kompozitok alkalmazása robbanásszerűen megnövekedett az ipar szinte minden ágában. Az erősítőanyagok túlnyomórészt szál jellegűek, hiszen ebben az esetben igen nagy felületen érintkeznek a mátrixszál, amely az anyagok közötti erős adhéziós kapcsolatot segíti elő. A szálforma a mechanikai tulajdonságok irányfüggővé válását eredményezi, tehát igen előnyösen anizotrop kompozit anyagokat állíthatunk elő. Az előny abból adódik, hogy általában az alkatrészek terhelése maga is anizotrop, vagyis kitételezett irányban (irányokban) érvényesül. A polimer kompozitokban a felület-térfogat arányt úgy is lehet növelni, ha apró részecskéként juttatjuk az erősítőanyagot a mátrixba. A részecske-erősítésű kompozitok is régóta ismeretesek. Ezek általában szívósabbak, hőállóbbak, ütésállóbbak a szálerősítésű társaiknál. A részecskék diszperz eloszlásúak, és az alakjuk általában amorf, ez okozza az izotrop tulajdonságaikat [1, 2]. A felület-térfogat arány szélsőséges esete, ha lapos korongokat alkalmazunk. Ha az erősítőanyag vastagsága 1-2 nm, átmérője 100-500 nm tartományba esik, akkor igen nagy lesz ez az arány. Az ilyen erősítőanyaggal előállított rendszereket nanokompozitoknak nevezzük. Ezek a rendszerek egyesítik a szál- és a mikrorészecske-erősítésű kompozitok előnyös tulajdonságait. Ha a "nanolemezek" az igénybevétel irányába rendezettek, a kompozit szakítási és hajlítási tulajdonságai kedvezőek, és a diszperz-eloszlásnak köszönhetően javulnak az energiaelnyelési tulajdonságok. Mindemellett a nanokompozitok sűrűsége általában kisebb, mint a szálerősítésű társaiké. A különleges szerkezet következtében a gázzáró tulajdonságok is számottevő javulást mutatnak. További jelentős előny, hogy ezek az anyagok általában jól fröccsenhetőek,

hőformázhatóak, sőt a fóliagyártásban is alkalmazhatók. A nanokompozitok a kereskedelemben is megjelentek, főbb alkalmazási területük az autóipar, és az élelmiszer-csomagolás [3, 4].

Az erősítőanyagként alkalmazott ásványzililikátok közül a montmorillonit alkalmazása kiemelkedő, olcsósága és viszonylag egyszerű feldolgozhatósága miatt [4]. A montmorillonit több-kevesebb mértékben minden agyagban előfordul. Számos talajnak, főképp a trópusi bentonitoknak amorf külsejű alkotórésze. Fiatal vulkáni hamuk kémiai lebomlásából keletkezik. Magyarországi előfordulási helyei: Tétény, Fertőrákos. A kedvező lemezes szerkezetet igen erős ionos kötések tartják össze. A rétegek között különböző mennyiségű víz és más anyagok adszorbeálhatnak. Lány, zsíros tapintású, de nem plasztikus anyagok, amelyek a víztől felduzzadnak. A lemezek szabályos alumíniumszilikát alapstruktúrájuk mellett tartalmazhatnak: Na⁺, Ca²⁺ és H⁺ kationokat is. Tipikus a hármas rétegződésű rács: két tetraéderekből felépített rács-sík közé egy oktaéderez rács-sík épül (1. ábra).

A tetraéderek közepén Si, az oktaéderek közepén Al atomok helyezkednek el. A lamellák összességében erős negatív töltéssel rendelkeznek, amelyet a rétegek között elhelyezkedő kationok kompenzálnak. Mivel az így kialakuló ionos kötés erős, a rétegtávolság mindössze 0,98 nm. Az ionos kötésnek köszönhetjük a jó duzzasztathatóságot. A nátrium iont tartalmazó montmorillonit a kompozitgyártás szempontjából a legkedvezőbb, mert a nátrium könnyebben eltávolítható, mint a többi kation [3, 6, 7]. Ahhoz, hogy a montmorillonit részecskéket alkalmazni tudjuk, el kell különíteni egymástól a lamellákat. Ennek első lépése a rétegek közötti kationok eltávolítása, azaz felületkezelést kell végezni. A felületkezelés során a lemezek egymástól 2-3 nm távolságra távolodnak, a felületkezelő szertől függően. Ez a távolság már elegendő ahhoz, hogy a lamellák közé polimer, illetve annak monomerjei beférjenek. A felületkezelő szer szerepe a lamellák eltávolításán kívül az, hogy a montmorillonit

*BME Polimertechnika Tanszék



1. ábra. A montmorillonit lemezek szerkezete [5]

részecskéket organofilizálja, azaz a szerves szilikátot összeférhetővé, nedvesíthetővé tegye szerves anyagokkal. A felületkezelő anyag tehát mintegy híd képez a polimer, és az erősítőanyag között. A terhelés átadása is ezen keresztül történik, tehát az adhéziós kapcsolat erőssége rendkívül fontos szerepet játszik a polimer kompozit mechanikai tulajdonságaiban [3, 4, 8].

Nanokompozitot többféle módszerrel lehet előállítani. Az egyik eljárás az *oldószeres technológia*. Ehhez olyan poláris oldószereket használnak, amelyek nemcsak a polimert oldják, de a rétegszilikátot is megfelelő mértékben duzzasztják. A kompozit mátrixaként szolgáló polimert oldott állapotban juttatjuk a lemezek közé, majd az oldószeret elpárologtatjuk. Az eljárás során igen kedvező tulajdonságú kompozit anyagok állíthatók elő, különösen a mechanikai tulajdonságok tekintetében.

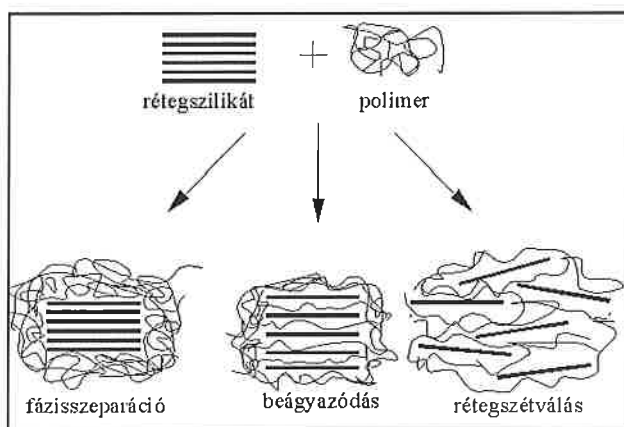
Egy másik módszer az úgynevezett *ömlédekes eljárás*. Lényege, hogy hőre lágyuló polimert ömladék állapotban, nagy nyíróerő biztosítása mellett keverjük össze az agyagásvánnyal. A nagy nyíróerőt jellemzően kétszágas extruderrel biztosítják. Az eljárás előnye az egyszerűségében rejlik, ezért ez a legelterjedtebb.

A harmadik eljárás az úgynevezett *in situ polimerizáció*, azaz a polimerizáció helyben, a lamellák között történik. A felületkezelte szilikátot folyékony monomerben duzzasztják, a monomer a rétegek közé diffundál, és iniciálás hatására polimerizálódik [3, 8]. A szakirodalom azt tanúsítja, hogy egyre többen próbálkoznak nanokompozitok *in situ* polimerizációval történő előállításával. Az eljárás igen körülményes, hiszen a polimerizáció nemcsak jelentős hőfejlődéssel jár, hanem rendkívüli körülményeket is igényel. Egyes esetekben az eljárás maga is igen összetett lehet: szigorú szabályozást alkalmaznak a temperálásához, a maradék monomerek, oligomerek eltávolítása különleges eljárásokat igényelhet. A polimerizáció esetleges inhibíciója miatt a reprodukálhatóság is nehezen valósítható meg [1, 9, 10].

Új utat nyitott az elektronsugárzással iniciált polimerizáció a nanokompozitok előállításának területén is, hiszen így a polimerizáció alacsony hőmérsékleten is végrehajtható, nincs szükség különböző kiegészítő berendezésekre alkalmazására, és a reprodukálhatóság is jóval egyszerűbb. A sugárkezelte monomerekben a legfontosabb reakciók a polimerizáció, a térlődés, a lánchasadás, a kis molekulájú gáz alakú termékek keletkezése és a telítettség eltűnése, illetve keletkezése, a monomer illetve polimer típusától és a körülményektől függően. A po-

limer molekulák nagy méretének következtében már kisszámú reakció (kis dózis) is nagy hatást gyakorol a fizikai tulajdonságokra: a térlődés esetén a molekulásúly nő, és végeredményben oldhatatlan és megolvaszthatatlan, egyetlen óriásmolekulát alkotó terméket kapunk, míg a lánchasadás következménye a molekulásúly csökkenése [11-18]. Elektronsugárzással főleg térlődés polimereket állítanak elő, ezzel szemben a mi célunk hőre lágyuló nanokompozit létrehozása. Az ellentét úgy kerülhet feloldásra, hogy az elektronkezelés során csak annyi monomert polimerizálunk, amennyit a rétegszilikát felülete képes adszorbeálni, majd az így kapott kompozitot megőrölve, ömladék-keveréssel, extruder segítségével juttatjuk az alapmátrixba. Elektronsugárzás segítségével már állítottak elő nanokompozitokat. Sharif és munkatársai [19] természetes gumiba keverték felületkezelte montmorillonitot, és azután elektronsugárzásnak vetették alá. Az eredmények kedvező szilárdsági tulajdonságokat mutattak: a szakítószilárdság 50%-kal növekedett meg a természetes gumiéhoz képest, mindössze 3% erősítőanyag mellett. A szakadási nyúlás pedig nem csökkent jelentős mértékben.

A különböző eljárások során előállított nanokompozitok szerkezetük szerint három fő csoportba sorolhatók (2. ábra). Ezek a csoportok azonban nem választhatók el egymástól kategorikusan, általában különböző arányban mindhárom szerkezeti forma előfordul egy anyagban.



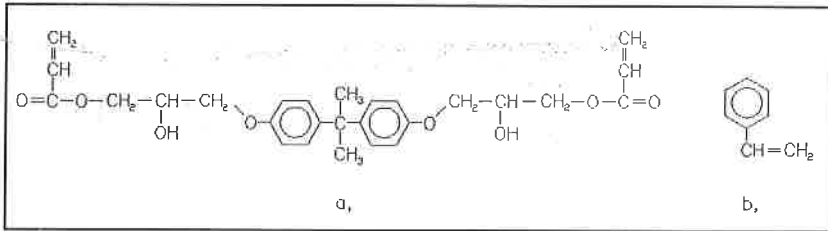
2. ábra. A nanokompozitok lehetséges szerkezetei [20]

Ha a polimer valamilyen oknál fogva nem tud a lemezek közé ágyazódni, fázisszeperáció jön létre. Tulajdonképpen mikrokompozitot kapunk, az ehhez tartozó tulajdonságokkal, ami a sikertelen felületkezelés, vagy a hibás előállítási technológia következménye lehet. Beágyazódás, azaz interkalációs szerkezet jön létre, ha a lemezek közötti vonzóerőt nem tudjuk teljes mértékben megszüntetni, de egy-egy polimerlánc a rétegek közé ékelődik. Szilárdsági jellemzőik a mikrokompozitok szerkezeténél jobbak. Ideális esetben a szilikát rétegek teljesen szétválnak, a polimer-agyagrészecske kapcsolat teljessé válik, a mechanikai, a gázcáró és hőstabilitási tulajdonságok jelentős mértékben javulnak [3-4, 9].

Az elektronkezeléssel helyben (*in situ*) polimerizációval a rétegszétválás módszerére igen esélyesnek minősíthető, ezért alapos szakirodalmi kutatást végeztünk a számunkra fontos hőre lágyuló polimerek esetleg így készült montmorillonitos kompozitjai tárgyában. A PA-agyagásvány kompozit elektronkezelésére utaló nyomot azonban nem találtunk. Ezért célul tűztük ki egy ilyen típusú kompozit előállítását, és mechanikai tulajdonságainak vizsgálatát.

Alkalmazott anyagok és technológiák

Az elektronkezelésnél használt monomer kiválasztásánál több tényezőt is figyelembe kellett venni. Az egyik, hogy a monomer szobahőmérsékleten könnyen feldolgozható, folyékony halmazállapotú, stabil anyag legyen, és elektronsugárzás hatására polimerizálódjon. Másik követelmény, hogy az előállított polimer jó adhéziós kapcsolatot tudjon létrehozni a PA-6 mátrixszal, valamint nem utolsósorban, a monomer a szilikátrétegek közé könnyen be tudjon jutni. Előkísérleteinkben stírol monomert és dián-epoxi-akrilát oligomert hasonlítottunk össze (3. ábra).



3. ábra. Molekulák szerkezete [21, 22] – a, dián-epoxi-akrilát; b, sztírol

Kémcsövekben 5 g mennyiségű monomert illetve oligomert kevertünk 1 g rétegszilikáthoz. A kémcsöveket lezártuk, és enyhe összerázást követően 24 óráig állni hagytuk. Ezt követően az ülepedés mértékéből következtetni lehetett arra, hogy az alkalmazott anyag milyen mértékben volt képes a rétegek közé hatolni, az agyagásványt duzzasztani. Az eredmények azt mutatták, hogy a sztírol alig duzzasztotta a montmorillonitot, míg dián-epoxi-akriláttal kedvezőbb eredményt értünk el. A dián-epoxi-akrilát, mint a 3. ábrán látható, viszonylag nagy molekulájú, és ezáltal nagyobb viszkozitású anyag. Ahhoz, hogy ez az oligomer a szilikátrétegek közé hatoljon, valamilyen eljárással a rétegek érdemes fellazítani. Az előduzzasztási kísérleteket acetonnal is elvégeztük, és arra a következtetésre jutottunk, hogy az aceton jól duzzasztja a montmorillonitot, ugyanakkor a dián-epoxi-akrilátnak is jó oldószere. Tehát, ha a keverési műveletet acetonos epoxi-akrilát oldatban hajtjuk végre, akkor kedvezőbb eredményeket kaphatunk. Így a lemezek távolabb kerülhetnek egymástól, ezáltal az epoxi-akrilát molekulák könnyebben kerülhetnek a montmorillonit rétegek közé. Legkedvezőbb eredményt az 1:1:1 tömegarányú epoxi-akrilát, aceton, montmorillonit keverékkel értünk el.

A besugárzásra kerülő keverék előállításához 120 g montmorillonitot, 120 g acetont, és 120 g dián-epoxi-akrilátot használtunk fel. A montmorillonitot 6 órán keresztül szárítógépben tartottuk, a rétegek közötti víz eltávolítása végett. A kihűlt anyagot egy üvegedényben fokozatosan a már előre összekevert akrilát-aceton oldathoz kevertük. Az így kapott anyagot 12 órán keresztül állni hagytuk, légmentesen lezárt üvegedényben. Az előállított keveréket 150 µm vastagságban vittük fel üveglapokra, amelyekre előbb csekély mennyiségű Formula Five típusú formaleválasztót vittünk fel, majd 10 percig szabadlevegőn hagytuk, hogy az aceton eltávozhasson. Így a réteg vastagsága 125 µm alá csökkent, amely már a 175 keV-os elektronsugár behatolási vastagsága alatt van, így a rendszer elektronkezelésre alkalmas.

Az elektronkezelést az Energy Science Inc. (ESI) által gyártott 175 keV-os Electrocurrain berendezéssel hajtottuk végre. A besugárzás paraméterei: gyorsító feszültség $U = 170$ kV, elektron-áram $I = 8$ mA, katód-fűtés $P = 350$ W, illetve az anyag átfutási sebessége az elektronsugár alatt: $v = 10$ m/min. A paramétereiből számolható az anyagot ért dózis mértéke, amely $D = 100$ kGy [23].

A besugárzást N_2 atmoszférában hajtottuk végre, szobahőmérsékleten. A kapott kompozitot az üveglapról eltávolítottuk, majd a további felhasználáshoz nagyfordulatszámú őrlőberendezésben finomra őrlöttük. A kompozitot Brabender típusú, kétcsigás extruder segítségével állítottuk elő, 4 1/min fordulatszám mellett. Tiszta PA-6 hoz különböző mennyiségű kezelt nanoszilikát erősítőanyagot kevertünk. Az anyagokból 0,5, 1, illetve 3,0 m/m% montmorillonit tartalmú kompozitokat hoztunk létre, fajtánként 2 kg-ot. Az előállított anyagból a granulálást követően, fröccsöntéssel szabványos próbatesteket állítottunk elő. A vizsgálatok előtt az anyagokat egy légmentesen zárható üvegedényben, beállított 50%-os páratartalom mellett, minimum 24 óráig tartottuk. A méréseket ezt követően hajtottuk végre.

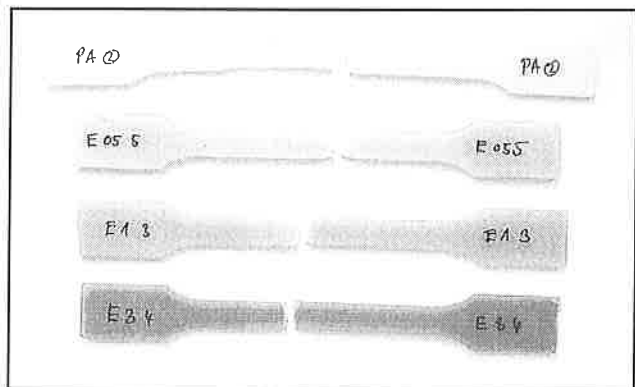
A hárompontos hajlítást Zwick Z050 típusú számítógép-vezérelt univerzális szakítógéppel végeztük, az ISO 178 szabvány szerint. A hajlítás sebessége 5 mm/perc, a két alátámasztás távolsága 64 mm volt. A szakítóvizsgálatot szintén ezzel a Zwick vizsgálógéppel végeztük, az MSZ EN ISO 527-1 szabvány szerint. A szakítás sebessége 50 mm/perc, a befogási hossz 80 mm.

A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározását műszerezett Ceast

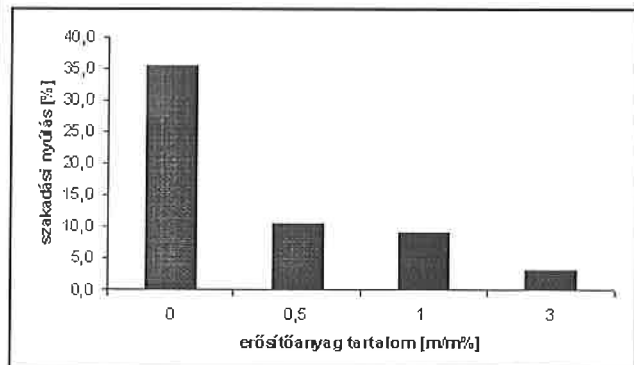
Resil Impactor Junior típusú ütőművel végeztük. A próbatestek méretei 80x10x4 mm, ami megegyezik a hajlítóvizsgálathoz használt próbatestek méreteivel, viszont a próbatesteken 2,5 mm-es bemetszést ejtettünk. Előzetes mérések alapján 2,192 kg tömegű kalapácsot választottunk, $l = 0,374$ m hosszú rúddal. A kalapács indítási szöge 90° -os volt, ennek megfelelően az ütközési energia 8,04 J, az ütközés sebessége 2,71 m/s. A próbatest megtámasztási pontjainak távolsága 40 mm.

Vizsgálati eredmények

A próbatestek a szakítóvizsgálat utáni állapotban láthatóak a 4. ábrán. A próbatestekben az erősítőanyag mennyisége felülről lefelé nő, sorrendben: 0; 0,5; 1; illetve 3%.



4. ábra. Próbatestek szakítás után



5. ábra. Szakadási nyúlás az erősítőanyag tartalom függvényében

Az 5. ábrán jól megfigyelhető, hogy a szakadási nyúlás a részecsketartalom függvényében jelentős mértékben csökken. Kis erősítőanyag tartalomnál a szakadási nyúlás mértéke még így is megfelelő képlékeny alakváltozási képességre utal.

Ha a szakítószilárdságot ábrázoljuk a részecsketartalom függvényében (6. ábra), megfigyelhetjük, hogy az nem változik jelentős mértékben az alapmátrixhoz viszonyítva, kis részecsketartalomnál mintegy 5% javulás mutatható ki.

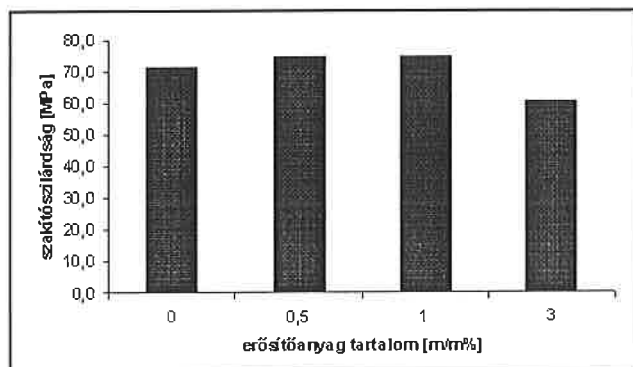
A 3% erősítőanyagot tartalmazó anyag esetében jelentékeny visszaesés figyelhető meg, a részecskék már olyan nagyszámú hibahelyet jelentettek, hogy az anyag ridegen tört, még mielőtt elérte volna a folyáshatárt.

A részecsketartalom növelésével párhuzamosan a húzó rugalmassági modulus is növekszik (7. ábra), mint ahogy az a részecsketartalomnál várható is. Megfigyelhető, hogy kis részecsketartalomnál is jelentős ez a növekedés.

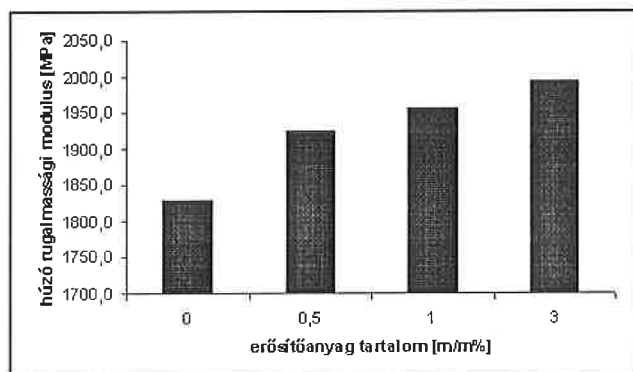
A hárompontos hajlító vizsgálatok során az eredmények kedvezőbben alakultak, mint a szakítás esetében. A határehajláshoz tar-

tozó feszültség (8. ábra) a részecsketartalom növelésének hatására nőtt. Az 1%-os esetben a változás mértéke 9%, a 3%-os esetben pedig meghaladja a 10%-ot.

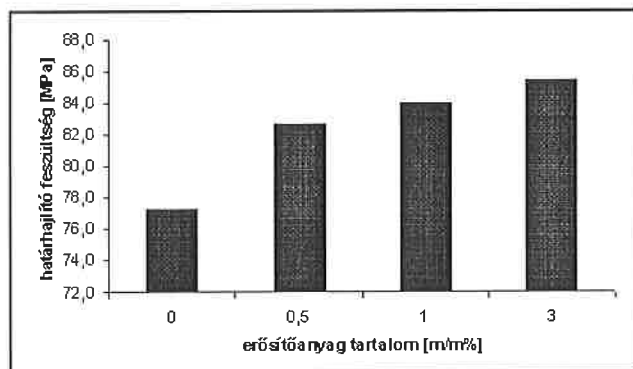
A hajlító rugalmassági modulus tekintetében az eredmények igen kedvezően alakultak (9. ábra). A 3%-os részecsketartalom esetén a



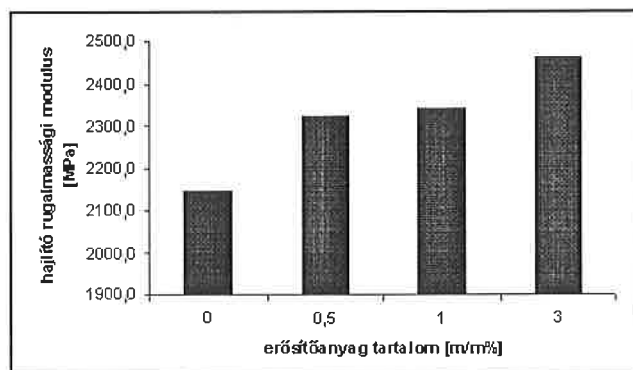
6. ábra. Szakítószilárdság az erősítőanyag tartalom függvényében



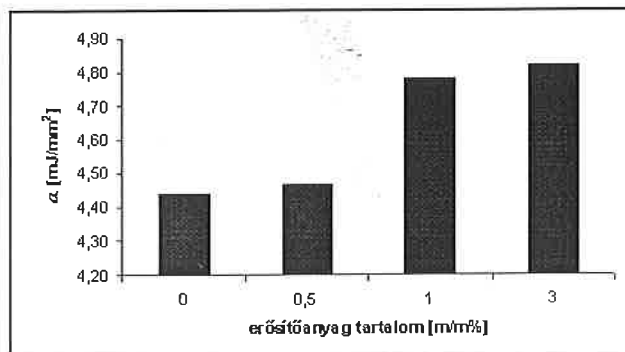
7. ábra. Húzó rugalmassági modulus az erősítőanyag tartalom függvényében



8. ábra. Határhajlító feszültség az erősítőanyag tartalom függvényében



9. ábra. Hajlító rugalmassági modulus az erősítőanyag tartalom függvényében



10. ábra. A fajlagos ütőszilárdság az erősítőanyag tartalom függvényében

javulás mértéke 15%. Ez a változás el is várható, annak tükrében, hogy mennyivel csökkent az anyag képlékeny alakváltozási képessége, amelyre főleg a szakadási nyúlás csökkenése utal.

A repedésterjedéssel szembeni ellenálló képesség, azaz a feszültség intenzitási tényező, $K(Q)$, az erősítőanyag tartalomtól függetlenül szűk értékhatárok között, gyakorlatilag állandó maradt: $K(Q) = 3,1 - 3,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

A Charpy-féle fajlagos ütőszilárdság enyhe növekedését figyelhetjük meg a rétegszilikát tartalom növekedésével, (10. ábra), azaz az anyagok energiaelnyelő képessége kissé nőtt.

Gazdaságossági elemzés

A kifejlesztett kompozitok alkalmazhatóságának vizsgálata céljából érdemes egy fajlagos ár / tulajdonság hányadoson alapuló gazdaságossági elemzés elvégzése is. Az elemzés természetesen csak tájékoztató jellegű lehet, hiszen az alapanyagok ára rendkívül nagy szórást mutat (1. táblázat). A kompozitok előállítás költségeinél nem vettük figyelembe azoknak a műveleteknek a költségeit, amelyek a viszonyítási alapként figyelembe vett üvegszál erősítésű PA6 mátrixú kompozitnál is fellelnek, ilyen például az extrúzió vagy a fröccsöntés.

1. táblázat. Különböző anyagok beszerzési árai (becsült adatok)

anyag	~ Ft/kg
PA 6	400
üvegszál	440
montmorillonit	100
dián-epoxi-akrilát	2000
aceton	500

Az alapmátrix különkénti ára: 400 Ft/kg az általunk készített kompozitnál, ami körülbelül megegyezik az üvegszál erősítés esetén alkalmazott PA 6 árával.

Egyéb kezelési költségek: Az elektron besugárzás ára: ~ 2 Ft/kg·kGy, így az elektronsugaras eljárással (aceton, dián-epoxi-akrilát, montmorillonit 1:1:1 arányú felhasználásával) felületkezelt montmorillonit (MMT) ára: 2800 Ft/kg

Az üvegszállal erősített PA 6 kompozitokban rendszerint 30% erősítőanyag van, ezért összehasonlítási alapként is ezt a kompozitot tekintettük.

A számítások eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat. Különböző anyagok fajlagos ár/tulajdonság értékei

anyag	ár Ft/kg	ár/ R_m Ft/kg*MPa	ár/ σ_h Ft/kg*MPa	ár/ E_h Ft/kg*MPa	ár/ α Ft*m²/kg*kJ
PA 6	400,0	5,59	5,17	0,187	90,09
0,5 %MMT	412,0	5,50	4,99	0,178	92,38
1 % MMT	424,0	5,66	5,05	0,181	88,70
3 % MMT	472,0	7,84	5,52	0,192	97,93
PA 6 GF 30	412,0	4,12	3,58	0,081	51,50

A 2. táblázatot alaposabban megvizsgálva láthatjuk, hogy az erősítőanyag jelenléte nem befolyásolta jelentős mértékben a kompozit árát. Ennek két oka van, az egyik, hogy az üvegszál erősítés esetén, az alapanyagok ára nagyon közel áll egymáshoz. Montmorillonit alkalmazása esetén olyan kicsi a kompozitban a részaránya (0,5-1,0 %), hogy az a kompozit árát nem befolyásolja jelentősen. Látható továbbá, hogy szinte minden erősített esetben kisebb a fajlagos ár/tulajdonság hányados, mint az alaplátrixé. Kivételt ez alól a 3%-os erősítőanyag tartalmú kompozit képez.

Az összes ár/tulajdonság hányados az üvegszál erősítésű anyagnál a legelőnyösebb, ezen túlmenően kiemelkedő értékeket mutat a 0,5% agyagásvány erősítőanyagot tartalmazó kompozit. Azonban azt is figyelembe kell venni, hogy az ömledékes, illetve az elektronkezeléses eljárás esetén a kis erősítőanyag aránynak köszönhetően a sűrűség alig változik, míg 30% üvegszál jelenlétében 1,3-szoros sűrűsége növekedés tapasztalható. Ilyen irányú vizsgálatok ugyan nem történtek, de mind a gázzáró képesség, mind az energia elnyelő tulajdonságok tekintetében kedvezőbb eredmény várható a nanokompozitok esetében, mint szál-erősítés esetén. Összességében az eredmények azt mutatják, hogy elektronkezeléses eljárással továbbiakban is érdemes foglalkozni, a technológia fejlesztésével a műszaki mutatók és a fajlagos árak még kedvezőbben alakulhatnak.

Összefoglalás

Elektronkezeléssel iniciált *in situ* polimerizációval dián-epoxi-akrilátot próbáltunk beépíteni montmorillonit rétegszilikátba, hogy így PA mátrixú nanokompozitot állítsunk elő. Az epoxi-akriláttal kezelt anyagot örlés után, extruder segítségével PA6 mátrixba vittük, majd próbatesteket fröccsöntöttünk. A szilárdsági vizsgálatokat 50%-os relatív páratartalom mellett végeztük el. A szakítószilárdság a 0,5 % montmorillonit tartalmú anyagnál 70 MPa-ról 75 MPa-ra nőtt, a húzó rugalmassági modulus 10%-kal növekedett, valamint az anyag üve hajlító tulajdonsága is kedvezően, enyhén javult. Bár a szilárdsági jellemzők nem minden esetben alakultak a várakozásoknak megfelelően, összességében elmondható, hogy elektronsugárzás alkalmazása járható útja lehet a nanokompozitok előállításának. Az eljárás továbbfejlesztésével, megfelelő anyagok kiválasztásával és a kezelés optimalizálásával jó esélyt látunk kedvező tulajdonságú, műszaki műanyagként alkalmazható nanokompozitok létrehozására.

Irodalom

[1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
 [2] Artinger I., Csikós G., Krállics Gy., Németh Á., Palotás B., Fémek és kerámiák technológiája, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
 [3] Lehoczki L., Nanokompozitok előállítása, szerkezete, éghetősége és alkalmazása, BME-OMIKK- Műanyagok alkalmazása, 2002/5, 25-33.
 [4] Lehoczki L., Nanokompozitok I., Műanyag és Gumi, 2000. 37. évf. 8. szám, 257-260.
 [5] S. Morlat-Therias, B. Mailhot, J. Gardette, C. Silva, B. Haidar, A. Vidal, Photooxidation of ethylene-propylene-diene/montmorillonite nanocomposites, Polymer Degradation and Stability 90, 2005, 78-85.

[6] Mauritz B., Vendl A., Asványtan II. kötet, Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, Budapest, 1942.
 [7] E., Agyagásványok, Akadémiai kiadó, Budapest, 1973.
 [8] X. A. Fu, S. Qutubuddin, Swelling behaviour of organoclays in styrene and exfoliation in nanocomposites, Journal of Colloid and Interface Science 283, 2005, 373-379.
 [9] J. Jordan, K. I. Jacob, R. Tannenbaum, M. A. Sharaf, I. Jasiuk, Experimental trends in polymer nanocomposites - a review, Materials Science and Engineering 393, 2005, 1-11.
 [10] P. Uthirakumar, M. K. Song, C. Nah, Y. S. Lee, Préparation and characterization of exfoliated polystyrene/clay nanocomposites using a cationic radical initiator-MMT hybrid, European Polymer Journal 41, 2005, 211-217.
 [11] Dobó J., Gyakorlati sugárgémia, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967.
 [12] R. J. Woods, A. K. Pikaev, Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1994
 [13] A. J. Berejka, C. Eberle, Electron Beam Curing of Composites in North America, 12th International Meeting on Radiation Processing, Avignon, France, 2001.
 [14] L. Fengmei, B. Jianwen, C. Xiangbao, B. Huaying, W. Huiliang, The Influence Factor of EB Curing Epoxy Matrix, 12th International Meeting on Radiation Processing, Avignon, France, 2001.
 [15] C. Sanders, V. Lopata, W. Kremers, Electron Curing of Composite Structures for Space Applications, Executive summary, 1997.
 [16] Czajlik I., Takács E., Czvikovszky T., Reactive Oligomers: The Key Compounds of The Next Years Radiation Chemical Technology, Radiat. Phys. Chem., 35, 64, 1990.
 [17] Czajlik I., Takács E., Alpár T., Czvikovszky T., Advanced Materials Made by Radiation Processing, Radiat. Phys. Chem., 31, 639, 1988.
 [18] J. J. Janke, R. E. Norris, K. Yarborough, S. J. Havens, V. J. Lopata, Critical Parameters for Electron Beam Curing of Cationic Epoxies and Property Comparison of Electron Beam Cured Cationic Epoxies Versus Thermal Cured Resins and Composites, EB curing Composites Workshop, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1996.
 [19] J. Sharif, W. M. Z. W. Yunus, K. Z. H. M. Dahlan, M. H. Ahmad, Preparation and properties of radiation crosslinked natural rubber/clay nanocomposites, Polymer Testing, XX, 2004, 1-7.
 [20] S. S. Ray, M. Bousmina, Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world, Progress in Materials Science 50, 2005, 962-1079.
 [21] Czvikovszky T., Helyes L., Madai Gy., Energiatakarékos papírbevonási technikák UV-sugárzással és elektronkezeléssel, Papíripar, 6, 1983.
 [22] V. P. Privalko, V. F. Shumsky, E. G. Privalko, V. M. Karaman, R. Walter, K. Friedrich, M. Q. Zhang, M. Z. Rong, Viscoelasticity and flow behaviour of irradiation grafted nano-inorganic particle filled polypropylene composites in the melt state, Journal of Materials Processing Technology 137, 2003, 208-213.
 [23] Electrocurtain gépkönyv, Energy Science, Inc., Massachusetts, USA, 1988.