

Vákuuminjektálásos eljárással készült réteges szerkezetű kompozitok hajlító tulajdonságainak elemzése

Simon Zoltán László* – Dr. Vas László Mihály*

A szálerősített polimerek egyre nagyobb teret nyernek a mindennapi használatú tárgyaink körében. Régen még csak az űrtechnikában, illetve a hadiiparban alkalmazták ezt az anyagot, de ma már bárki számára hozzáférhető. Anyagvizsgálati szempontból fontos, hogy mechanikai tulajdonságaikat és terhelésre adott válaszaikat megértsük, tanulmányozzuk [1].

Cikkünkben, réteges szerkezetű polimer kompozit minták hajlító igénybevétellel szembeni viselkedését tanulmányoztuk. A próbatesteket vákuuminjektálásos eljárással készítettük, majd azokon hárompontos hajlítóvizsgálatokat végeztünk. A szabvány szerint számolt hajlító tulajdonságokat az alátámasztási távolság – vastagság viszonyában elemeztük. Munkánkban bemutatjuk azt az általunk kidolgozott módszert, mellyel a hajlító tulajdonságok változása az egész, lehetséges mérési értéktartományára kiterjeszhető.

Próbatestek gyártása

A tanulmány egyik célja az volt, hogy reprodukálhatóan jó minőségű próbatestek előállítására alkalmas technológiát dolgozzunk ki. A korábban alkalmazott kézi laminálásos és préseléses próbatest előállítási eljárások helyett az ún. gyanta infúziós technológiákat választottuk ki. Ezen módszerek közül is a vákuuminjektálásos eljárás bizonyult megfelelőnek, melynek lényege, hogy vákuum segítségével szívjuk be a szerszámüregbe előre behelyezett erősítőanyagba a kis viszkozitású hőre keményedő mátrixanyagot.

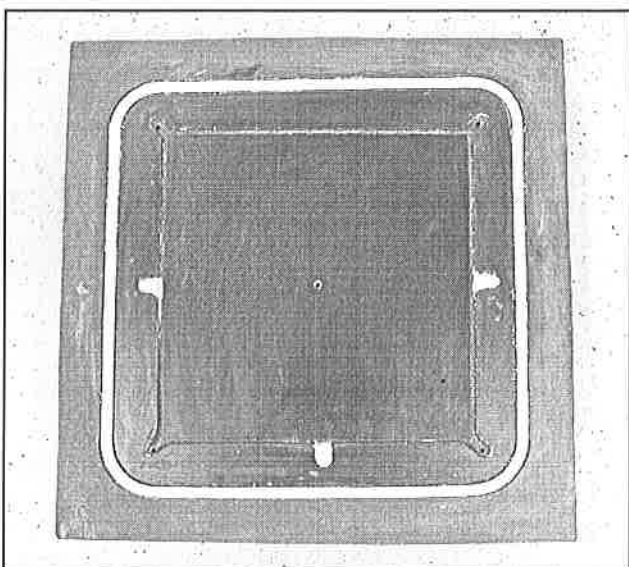
Első lépésként a gyártási eljáráshoz alkalmas szerszámot terveztünk, majd készítettünk el. A vákuuminjektálásos technológia sajátossága, hogy egy- vagy kétoldali merev szerszámmal is működőképes. A termék mindkét oldalán megfelelő felületi minőség és az állandó vastagság érdekében a kétoldali merev szerszámozás mellett döntöttünk.

A terméket, melyekből későbbiekben próbatesteket munkáltunk ki, egy 300x300x4 mm méretű síklapként definiáltuk. Ahhoz, hogy az impregnálási folyamatot figyelemmel tudjuk kísérni, egy átlátszó szerszám-

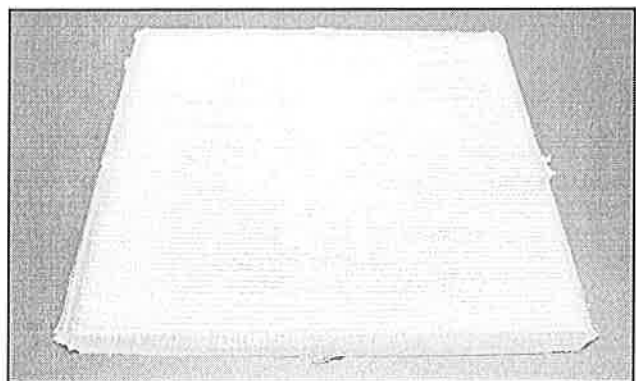
félre volt szükség. Ehhez egy 20 mm vastagságú sík üveglapot használtunk. Ez a vastagság szükséges volt ahhoz, hogy a szerszámfél megfelelő merevségű legyen, azaz a vákuum ne okozza a szerszám behajlását. A szerszámüreggel rendelkező oldalt kézi laminálásos technológiával állítottuk elő, üvegszál erősítésű poliészter mátrixanyagból. Az így elkészített szerszámban (1. ábra) előre kialakítottunk különböző beömlési illetve elszívási pontokat, melyek a négy sarokponton, a három oldal felezőjénél és a formaüreg közepén helyezkedtek el.

Erősítőanyagként kereskedelmi forgalomban kapható (Saint-Gobain Vetrotex gyártmányú), 300 g/m² felületi tömegű, vászonkötésű üveg-szövetet alkalmaztunk. Mátrixanyagként, az ugyancsak kereskedelmi forgalomban kapható telítetlen poliészter gyantát (UCB gyártmányú) és metil-etil-ke-ton-peroxid térhálósítót használtunk.

A formaleválasztóval kezelt szerszámfelek közé 12 réteg, előre kiszabott erősítőanyagot fektettünk, ügyelve arra, hogy azok lánc- illetve vetülékirányai minden rétegben ugyanolyan irányban álljanak. A kisméretű szerszám zárását kézi szorítókkal (oldalanként két-két darab) oldottuk meg. Ezt követően, a négy sarokponti beömlőnyílásra és a formaüreg közepén lévő elszívási pontra (a többi nyílást tömítve) csatlakoztattuk a szükséges szerelvényeket. Majd a beömlési pontokat lezárva, a szerszámból vákuumpumpa segítségével kiszivattyúztuk a levegőt, így győződve meg annak teljes zárásáról. Utolsó lépésként a beömlő vezetékeket megnyitva a szerszámba engedték az előre beinicializált poliészter mátrixanyagot. Az erősítőanyag átimpregnálódását követően a beömlési és elszívási pontokat légmentesen lezártuk, majd a térhálósodás után a terméket (2. ábra) eltávolítottuk.



1. ábra. A formaüreggel rendelkező szerszámfél



2. ábra. A vákuuminjektálásos eljárással készült kompozit lemez

Az így elkészült lapokat 50°C-on 6 órán keresztül utótérhálósítottuk, biztosítva a folyamat teljes végbemenetelét. A gyártási eljárás minőségére jellemző mérőszámoknak a próbalapok vastagságát és száltartalmát tekintettük. Minden esetben elmondható volt, hogy nagyon kis mértékű szórással (< 5 %) az egyes lapok jellemzői állandóak voltak. A próbalapok jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza. A minták száltartalmát kiegészítő módszerrel határoztuk meg. A valós vastagságok (h, mm) eltérése a névlegestől (4 mm) a mátrixanyag zsugorodása miatt lépett fel.

1. táblázat. Az injektált lapok jellemzői

Erősítőrétegek száma	12
Vastagság	3,8 ± 0,1 mm
Sűrűség	1,6 ± 0,06 g/cm ³
Száltartalom (térfogati)	35,8 ± 2 %

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9.

A 15 mm szélességű (b, mm), különböző hosszúságú (l, mm) próbatesteket egymánbevonatú fűrészsel munkáltuk ki.

A hajlítóvizsgálat és eredményei

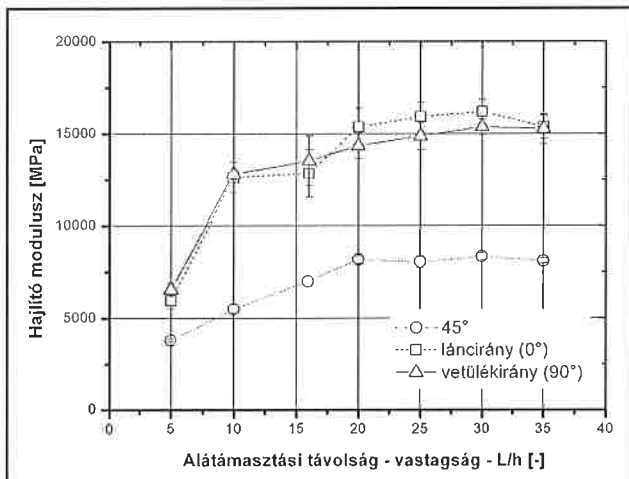
Az MSZ EN ISO 14125 szabvány előírásait szem előtt tartva hajtottuk végre a hajlítóvizsgálatokat, különböző alátámasztási távolság – vastagság arányoknál (L/h). A méréseket Zwick Z020 típusú, számítógép vezérelt szakítógépen végeztük. A hárompontos hajlító feltét alsó támaszainak lekerekítési sugara 2 mm, a nyomófej lekerekítési sugara 5 mm volt. A méréseket 2 mm/min állandó terhelési sebességgel, szoba-hőmérsékleten hajtottuk végre. A vizsgálat során a szakítógép szoftverének segítségével folytonosan regisztráltuk az összetartozó lehajlás: f, (mm) és nyomóerő: F, (N) értékpárokat.

A mérési sorozatot három kitüntetett irányban hajtottuk végre: lánc-, vetülék- ill. 45°-os irányban. Az egyes irányokban végzett mérések alátámasztási távolság – vastagság arányát (L/h) 5 és 35 között változtattuk. Minden egyes beállításnál 5-5 jó mérést hajtottunk végre.

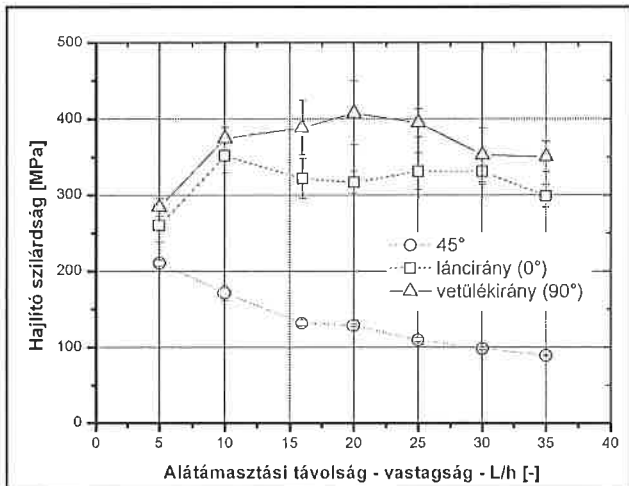
Mérési eredmények

A rögzített erő-lehajlás görbékből a klasszikus rúdelmélet segítségével számítottuk a kompozit próbatestek hajlító mechanikai tulajdonságait [2, 3]. Nagy L/h viszonyok esetében, illetve a 45°-ban kivágott próbatesteknél, amennyiben szükséges volt, nagy lehajlásnál ($f > 0,1L$) a szabvány szerint ajánlott módszerrel korrigáltuk az eredményeket. A hajlító rugalmassági modulus alakulását az alátámasztási távolság – vastagság arány függvényében a 3. ábra szemlélteti.

Az ábrából egyértelműen az következik, hogy növekvő próbatest-



3. ábra A hajlító modulus az L/h függvényében

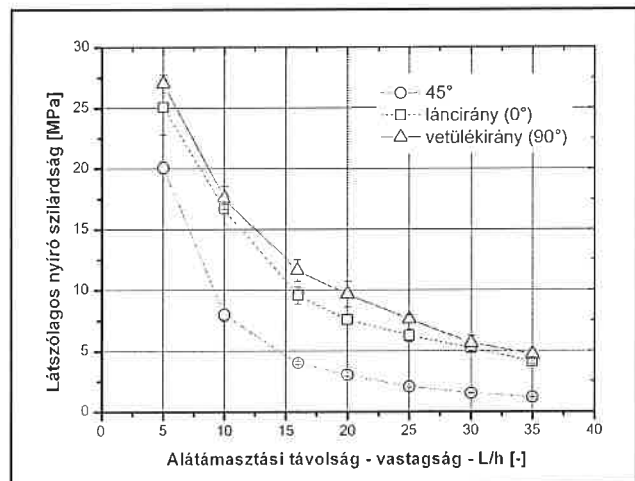


4. ábra. A hajlítószilárdság az L/h függvényében

méréssel (növekvő L/h-val) a rugalmassági modulus egy véges érték felé monoton növekedve tart [4].

A számított hajlítószilárdság értékeinek változását a 4. ábra mutatja. A vizsgált esetekben a száldomináns irányokban (lánc- ill. vetülékirány) a szabvány szerint számolt hajlítószilárdság értéke a kezdeti szakasz (L/h < 20) leszámítva lényegében egy átlagérték körül ingadozik, illetve enyhe csökkenést mutat. Az L/h = 30 és 35 értékeknél a csökkenés annak tudható be, hogy a szabvány által ajánlott korrekciós módszerek nem megfelelően kompenzálják a túlzottan nagy lehajlásoknál fellépő torzító hatásokat. A 45°-ban kivágott próbatestek esetében a szilárdság folytonosan csökkenő jellegűt ölt.

A látszólagos rétegekzi nyírószilárdság változása az 5. ábrán követhető nyomon. Minden vizsgált irányban a görbe azonos jelleggel – más anyagoknál is tapasztalt módon [5] – folytonosan csökken.



5. ábra. A látszólagos nyírószilárdság az L/h függvényében

A hajlítóvizsgálatok eredményei egyértelműen mutatják, hogy a vákuuminjektálási eljárással készült, réteges szerkezetű kompozit próbatestek mechanikai tulajdonságai nagymértékben függenek az alátámasztási távolság – vastagság viszonytól, azaz a próbatestek geometriai méretétől.

A modulus eredmények kiterjesztése

A mérési eredményeket alapul véve, a próbatest méretei és hajlító tulajdonságai közötti kapcsolat analitikus úton is leírható, ezáltal az eredmények az L/h = x támaszköz – vastagság arány teljes lehetséges értéktartományára kiterjeszhetők ($0 < x < \infty$).

Módszerünk lényegét a láncirányban végzett mérésekből számolt hajlító rugalmassági modulus értékekre mutatjuk be. A klasszikus rúdelmélet szerint:

$$E_b = \frac{1}{4b} \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^3 \frac{\Delta F}{\Delta f} = \frac{1}{4b} x^3 g(x)$$

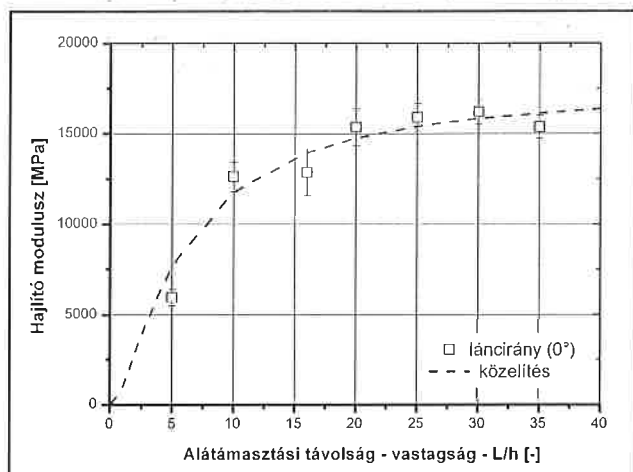
A képlet parametrizálása után jól látható, hogy feladatunk a g(x) függvény meghatározása volt. A mérési eredményeket és az aszimptotikus terhelési viszonyokat figyelembe véve a keresett függvénynek monoton növekedőnek, a szélső értékeknél (L/h = 0 ill. L/h = ∞) pedig végesnek kell lennie. Egy korábbi, unidirekcionális szénszál erősítésű epoxi mátrixú kompozit minták hajlítóvizsgálatával foglalkozó tanulmányban [5] bemutatott eredmények szerint a modulus változásának leírására alkalmas függvény:

$$g(x) = \left[\frac{1 + a_1 x}{b_0 + b_1 x + b_2 x^2} \right]^3$$

A keresett paramétereket (a_1, b_0, b_1, b_2) a mérési eredményekhez legjobban illeszkedő esetre iterálással határoztuk meg:

$$a_1 = 0,2, \quad b_0 = 0,0179 \left[\frac{N}{mm} \right]^3, \quad b_1 = 0,0129 \left[\frac{N}{mm} \right]^3, \quad b_2 = 0,0019 \left[\frac{N}{mm} \right]^3$$

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* – Czvikovszky 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 fröccsönthetőek,

hőformázhatóak, sőt a fóliagyártásban is alkalmazhatók. A nanokompozitok a kereskedelemben is megjelentek, főbb alkalmazási területük az autópia, 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. Lágú, 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 köszönhetően 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