

SZÉPLAKI PÉTER¹, SUPLICZ ANDRÁS^{1,2}

POLIAMID 6 MÁTRIXÚ KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZETEK GYÁRTHATÓSÁGA T-RTM TECHNOLOGIÁVAL

PRODUCIBILITY OF POLYAMIDE 6 COMPOSITE SANDWICH STRUCTURES BY T-RTM TECHNOLOGY

Munkánk során habmagos szendvicsszerkezetű kompozit szerkezeteket gyártottunk T-RTM technológiával. Ennek megvalósításához első lépésként kidolgoztunk egy gyártástechnológiai folyamatot. A gyártási folyamat részeként elkészítettük a habmagos struktúrákat kémiai habosítószer segítségével, majd ezek felhasználásával létrehoztuk a szendvicsszerkezeteket T-RTM technológiával, melyeknél mind a mátrix, mind a habmag PA6 (poliamid 6) alapanyagú. A kész mintadarabokat mechanikai vizsgálatokkal minősítettük. Az elért eredmények értékeléséhez két- és négyrétegű kompozit lemezeket használtunk referenciaként.

In our work, we have produced composite sandwich structures with foam core with T-RTM technology. To achieve this, we developed a multi-step manufacturing process. As part of the manufacturing process, we prepared the foam core structures using a chemical foaming agent and then used these to create sandwich structures using T-RTM technology, with both the matrix and foam core being PA6 based. The prepared samples were subjected to mechanical tests. For the evaluation of the results, polyamide composite laminates with two and four layers were used as references.

1. BEVEZETÉS

A kompozitokat az emberiség már több ezer éve használja és alkalmazza a mindennapokban. Definícióból adódóan többfázisú, összetett, több anyagból álló szerkezetéről beszélünk, amely erősítőanyagból és mátrixból áll [1], és minden komponense előnyös tulajdonságát kihasználja, hogy egy igen nagy szilárdságú, tartós rendszert hozzon létre. Manapság az elsődleges mátrix alapanyagok alapvetően térhálós szerkezetűek, főként epoxi alapúak. Ezen termékek újrahasznosítása, illetve javíthatósága korlátozott. Ennek a problémának a kiküszöbölésére több alternatív megoldás kidolgozása is folyamatban van az iparban. Az egyik ilyen a vitrimerek alkalmazása, ahol a dinamikus kovalens kötések például hő hatására vagy katalizátor alkalmazásával képesek felbomlani és újra képződni [2].

Egy másik irány a hőre lágyuló mátrix alapanyagok alkalmazása. Az elmúlt évtizedek során igen népszerűvé vált a rövidszálal erősítésű, fröccsöntött termékek használata a nagy volumenben való gyárthatóság és a jó mechanikai tulajdonságok miatt. Emellett azonban meg kell említeni a technológia korlátait is, hogy a gyártás során keletkezett összecsapáshelyek kritikus hibahelyként jelentkezhetnek, valamint az elérhető száltartalom mértéke is erősen korlátozott. Erre jelenthet megoldást a hőre lágyuló injektálási technológia (T-RTM – Thermoplastic Resin Transfer Molding), ami az utóbbi években egyre dinamikusabban

fejlődik [3-5]. A technológia alapját az anionos gyűrűfelnyitások polimerizáció képezi, amely során ϵ -kapolaktámból állítanak elő poliamid 6-ot (PA6) [6]. A folytonos erősítésű poliamid termékek gyártását az teszi lehetővé, hogy az ϵ -kapolaktám olvadék állapotban kis viszkozitással rendelkezik (3-5 mPa·s), így az képes átimpregnálni az erősítőszövetet és csak ezután polimerizálódik, ezzel jó minőségű, homogén tulajdonságú terméket létrehozva [7]. A T-RTM technológia ötvözi a hagyományos gyantainjektálás (RTM) és a hőformázás előnyeit. A technológia lehetővé teszi, hogy a klasszikus kompozit gyártási technológiákhoz hasonlóan optimalizáljuk a rétegrendeket, és a rövid gyártási ciklusidő miatt bevezethető legyen a tömeggyártásba. A hőre lágyuló PA6 mátrixnak köszönhetően a végtermék újrahasznosítható, ami csökkenti a környezeti terhelést és megfelel a szigorú előírásoknak.

A kompozit lemezek szakítószilárdsága és modulusza kiváló, azonban hajlítómerevségük a felépítésükből adódóan limitált. Erre a problémára jelent megoldást a szendvicsszerkezetek alkalmazása.

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.

² MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műgyetem rakpart 3.

Lényegük, hogy két, egymással párhuzamos, nagy szilárdságú lemez (fedőlemezek) között egy kis sűrűségű, kis szilárdságú, de lényegesen vastagabb anyag (maganyag) kap helyet. A szendvicsszerkezetek révén jelentősen megnövelhető a hajlítómerevség, miközben javulnak a szerkezet fajlagos mechanikai jellemzői is [8-11].

Kutatásunk célja, hogy megvizsgáljuk, T-RTM segítségével lehet-e jó minőségű, szénszál erősítésű, habmagos szendvicsszerkezetet előállítani, ahol mind a habmag, mind a kompozit fedőréteg PA6 alapú, létrehozva ezzel egy könnyebben újrahasznosítható terméket. Ehhez gyártottunk referenciaként két-, illetve négyrétegű kompozit lemezeket, valamint kidolgoztuk a habmagos kompozitszerkezet gyártási technológiáját. A mintákon vizsgáltuk a hajlítómerevség változását, valamint elemeztük a habmag struktúráját és az ebből következő jelenségeket.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

2.1. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK

A habmagok előállításához a Grupa Azoty (Lengyelország) Alpha-33 típusú poliamid 6 anyagát választottuk, melynek az olvadáspontja 221 °C, sűrűsége 1,13 g/cm³. A habmag előállításához Unifoam AZ típusú azo-dikarbon-amid (ADCA) habképzőszert használtunk fel (Otsuka Chemical Co. Ltd, Japán), amely egy exoterm típusú kémiai habképzőszer. Bomlási hőmérséklete 195 és 202 °C között található a gyártói adatlap szerint.

A kompozit lemezekben és a szendvicsszerkezetekben használt erősítőanyag a Saertex által készített X-C-305 típusú, +45°/-45° biaxiális elrendezésű szövet volt, melynek alapanyaga a Zoltek Zrt. Panex 35-61 A 50K szénszála. A rétegek területi sűrűsége 150 g/m², az elemi szálak átmérője 7,2 μm. A T-RTM technológiával történő gyártás során AP-Nylon ϵ -kapolaktámmal (Brüggolen CL, L. Brüggemann GmbH & Co. KG, Németország) dolgoztunk, mely 69 °C-os olvadásponttal rendelkezik, olvadék állapotban a sűrűsége 1,02 g/cm³. Iniciátorként nátrium-kapolaktámmat használtunk (Brüggolen C10, L. Brüggemann GmbH & Co. KG, Németország), melynek olvadáspontja 62,2 °C, sűrűsége (olvadék állapotban) 1,02 g/cm³. Az aktivátor hexametilén-1,6-dikarbamoil-kapolaktám (Brüggolen C20P, L. Brüggemann GmbH & Co. KG, Németország) volt. Ennek olvadáspontja 70 °C, sűrűsége olvadék állapotban ugyancsak 1,02 g/cm³. Az alapanyagokat a jó nedvszívó képességük, illetve a nedvességtartalom iniciátorra való deaktiváló hatása miatt a felhasználásig 40 °C-on, vákuum alatt tároltuk.

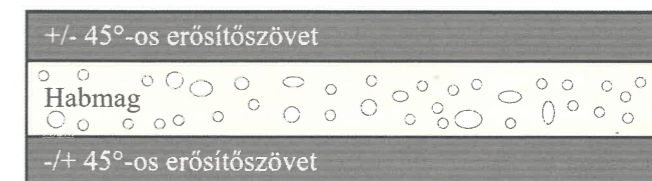
2.2. VIZSGÁLATI MINTA ELŐÁLLÍTÁSA

A minták előállítása két lépésben zajlott. Először a habmagokat állítottuk elő. Ezeket egy Labtech 25-30C típusú extruderen készítettük szélesrésű szerszámmal, valamint Labtech LCR300 síkfólia gyártósor segítségével. A szerszám résmérete 0,3 és 1,5 mm között állítható, a gyártósoron előállítható maximális szélességű termék 200 mm.

Ezután az elkészült habmagokat felhasználva létrehoztuk a szendvicsszerkezeteket. Ezek gyártása egy Engel Insert 200V/200H/80 fröccsöntő gépből és D60-as in situ egységből álló T-RTM berendezés segítségével történt. A folyamat első lépéseként az

erősítőszövetet megfelelő méretűre vágtuk. A kivágott szöveteket és a habmagokat a gyártás előtt szárítószekrényben 8 órán át 80 °C-on kezeltük. Ennek oka, hogy a gyártási folyamatban résztvevő aktivátor és katalizátor igen érzékeny a nedvességre. Ha az alapanyagok nem száradtak ki megfelelően, a bennük lévő nedvességtartalom leállítja a polimerizációs folyamatot és a magas maradék monomer tartalom miatt nem lesz megfelelő minőségű a kapott termék, illetve a rétegek között nem alakul ki a megfelelő kapcsolat.

A kompozitok előállításához 90%-ban ϵ -kapolaktámmat, 6 m/m%-ban C10 katalizátort és 4 m/m%-ban C20P aktivátort kevertünk össze. A kaprolaktámmal elkevert katalizátort és aktivátort külön-külön adagoló tartályokba töltöttük, hogy elkerüljük a polimerizációs folyamat idő előtti beindulását. Feladagolás után a szerszám helyezettük az összeállított erősítőstruktúrát, mely egy szövetrétegből, a korábban előállított habmagból és egy újabb szövetrétegből állt (1. ábra).



△ 1. ábra: Szendvicsszerkezet felépítése

A szerszámzárás után vákuumot hoztunk létre a szerszám formaüregében, ezzel kiküszöbölve a levegőben lévő esetleges polimerizációt gátló nedvességtartalmat és segítve a kitöltést. A megolvasztott alapanyagot egy dugattyú segítségével szállítja a rendszer. A két tartályból érkező komponenseket egy dinamikus keverőfej keveri el közvetlenül a formaüreg előtt, majd a már homogén alapanyagot injektáljuk a temperált szerszámába. A szerszám, a beömlőkúp és a keverőfej hőmérséklete 155 °C, az in-situ olvasztótartályok hőmérséklete 120 °C volt. Az injektálási térfogat komponensenként 90 cm³, a záróerő 80 t, a polimerizációs idő pedig 300 s volt. A gyártás során előállítottunk habmag nélküli két- és négyrétegű mintákat, melyek referenciaként szolgálnak a habmagos termékek minőségének értékeléséhez.

2.3. MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

A hajlítóvizsgálatokat egy Zwick Z020 (Zwick, Ulm, Németország) típusú univerzális szakítógépen végeztük. A szakítógép sebességtartománya 0,001-750 mm/perc, terhelhetősége -20 - +20 kN. A méréseket 21 °C-on, 30%-os páratartalom mellett végeztük ISO 14125-ös szabvány szerint, négy pontos hajlítóvizsgálattal. A mérési sebesség 5 mm/perc, a próbatestek téglalap alapú hasábok voltak 100x15x2 mm befoglaló mérettel. Az alátámasztási távolság 81 mm, a nyomófejek távolsága pedig 27 mm volt. A mérés célja a habmagos termékek tulajdonságainak összehasonlítása volt a két- és négyrétegű referencia mintákkal szemben. Ehhez meg kellett határozni a hajlítószilárdságot (σ). Hajlítószilárdságról abban az esetben beszélhetünk, ha a próbatest eltört a mérés során. Ha az alátámasztási távolság 10%-át meghaladja a lehajlás, nem alkalmazhatók a szokásos számítási képletek, mert ezután a nyíró igénybevételt is figyelembe kell

venni. Ebben az esetben határhajlító feszültséget (σ_h) számoltunk. A vizsgálatok során minden típusú mintából 5-5 darabot mértünk le.

A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot egy Ceast Fractovis 9350 típusú ejtődárdás ütőművön végeztük. A gép 2-től 70 kg-os előterhelésig használható, 10, illetve 20 mm-es dárdaátmérővel, 1 m-es ejtési magassággal, ami tovább növelhető egy rugós előfeszítéssel. A vizsgálati tér ezenkívül fűthető és hűthető -70 és 150 °C között. A mérés során 20 mm átmérőjű dárdát használtunk, melynek végén egy Charpy-kalapácsot helyettesítő toldat volt felszerelve. A 80x10x2 mm-es próbatesteket 3,7 m/s becsapódási sebességgel, 16,4 J energiának tettük ki szobahőmérsékleten. Az alátámasztási távolság 62 mm volt és ebben az esetben is 5-5 próbatestet vizsgáltunk minden típusnál.

2.4. MORFOLÓGIAI VIZSGÁLATOK

A morfológiai vizsgálatokhoz és a cellaméret eloszlás meghatározásához szükséges felvételeket egy JEOL JSM-6380LA (Jeol Ltd., Tokió, Japán) típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (Scanning Electron Microscope, SEM) készítettük. A gyártott habstruktúrákat, mivel elektromos vezetőképességük elhanyagolható, vizsgálat előtt egy JEOL JFC-1200 típusú berendezéssel aranyoztuk be.

3. SZENDVICSSZERKEZETEK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS MINŐSÍTÉSE

3.1. HABMAGOK MINŐSÍTÉSE

A habmagok előállításánál a korábban bemutatott ADCA habosítószerrel 0,5, 1, illetve 3 m/m%-ban adalékoltuk a PA6-hoz. Első lépésként a habmagokat vizsgáltuk meg sűrűségük és cellaszerkezetük szerint. Az átlagos sűrűséget desztillált vizes mérőközegben, analitikai mérleggel határoztuk meg a felhajtóerő alapján, az alábbi összefüggéssel:

$$\rho = \frac{m_{sa} \cdot \rho_l}{m_{sa} - m_{sl}} \quad (1)$$

ahol ρ (g/cm³) a minta sűrűsége, m_{sa} (g) a minta tömege levegőn mérve, m_{sl} (g) a minta tömege desztillált vízben mérve, ρ_l (g/cm³) a desztillált víz sűrűsége az adott mérési hőmérsékleten. Ezek után kiszámítottuk a habszerkezetek relatív sűrűségét, mely a habszerkezet mért sűrűségének és a habosítatlan PA6 sűrűségének hányadosa:

1. táblázat: Habsűrűség vizsgálat eredményei

Habosítószer tartalom	0,5 m/m%	1 m/m%	3 m/m%
Vastagság [mm]	1,29	1,35	1,47
Átlagos sűrűség [g/cm ³]	0,86	0,86	0,85
Sűrűség szórása [g/cm ³]	0,006	0,002	0,023
Relatív sűrűség [-]	0,761	0,761	0,753
Expanzió [-]	1,313	1,314	1,329

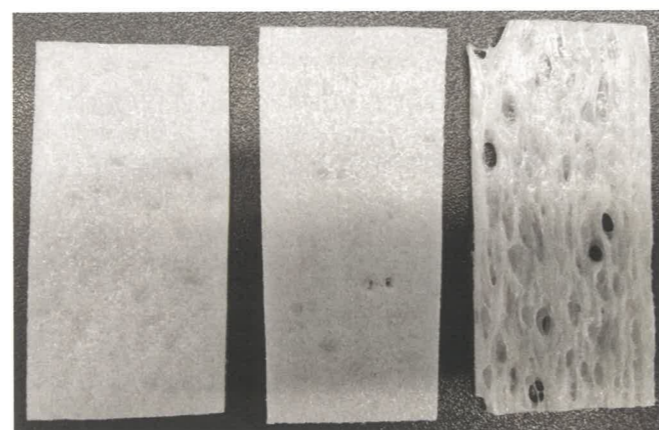
$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{hab}}{\rho_{polimer}} \quad (2)$$

ahol ρ_{rel} (-) a habszerkezet relatív sűrűsége, ρ_{hab} (g/cm³) a habszerkezet mért sűrűsége, valamint $\rho_{polimer}$ (g/cm³) a habosítatlan poliamid mátrix sűrűsége. Továbbá meghatároztuk az expanzió mértékét is, melyet az alábbi összefüggéssel számoltunk ki:

$$ER = \frac{\rho_{polimer}}{\rho_{hab}} = \frac{1}{\rho_{rel}} \quad (3)$$

ahol ER (-) az expanzió mértéke. Ezeket az eredményeket foglalja össze az 1. táblázat.

A 3 m/m%-os habosítószer tartalmú minták esetében az eredményekből látható (2. ábra), hogy a cellaszerkezetek minősége nem lett megfelelő. Bár a mért sűrűség érték ezeknél a mintáknál a legkisebb, a kapott átlagértékhez tartozó szórás messze itt lett a legnagyobb, ami mutatja, hogy nem konzisztens minőségű habszerkezetet kaptunk.

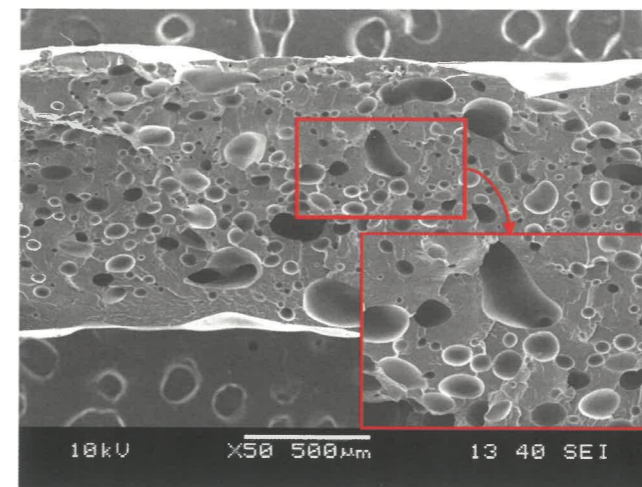


2. ábra: 0,5 m/m%-os (balra), 1 m/m%-os (középen) és 3 m/m%-os (jobbra) habosítószer arányú habmag minták

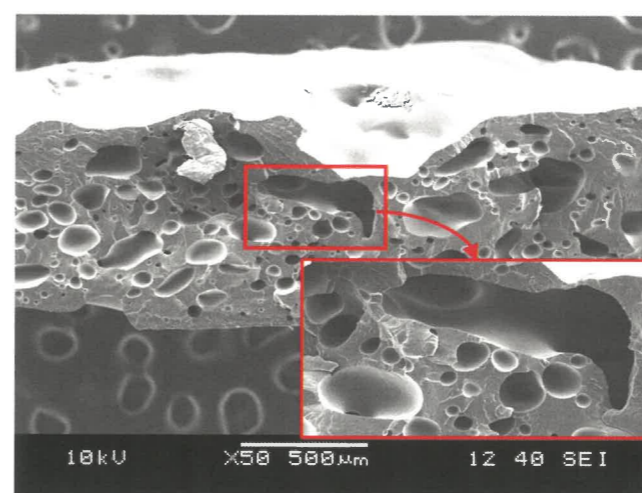
A cellaszerkezetek vizsgálatát SEM-mel végeztük, 10 kV gyorsítófeszültség mellett. A habmag mintákból kriogén töretfelületet hoztunk létre folyékony nitrogén segítségével, majd minden típusú habmagokról ötvenzörös nagyítással készítettünk felvételeket. Ezeket mutatja a 3-5. ábra.

Minden felvételen elemeztük a cellák méreteit és méreteloszlását, valamint meghatároztuk az átlagos cellaátmérőket. Ezeket foglalja össze a 6. ábra.

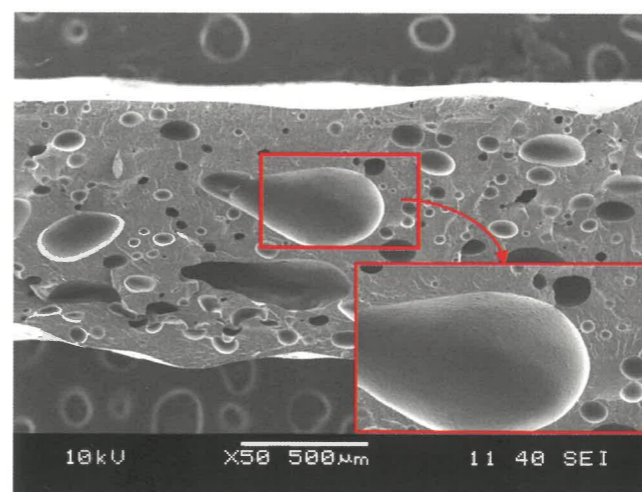
A diagram alapján megállapítható, hogy a habosítószer arányának növekedésével az átlagos cellaátmérő is nő, ugyanakkor annak szórása is jelentősen emelkedik. Ennek további vizsgálatára



3. ábra: 0,5 m/m%-os habosítóarányú habmag SEM képe

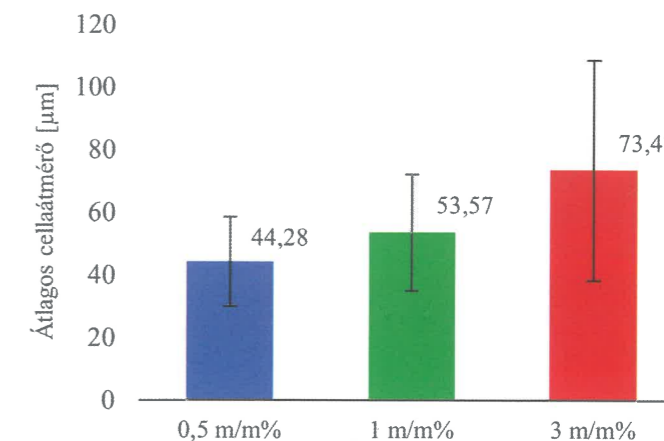


4. ábra: 1 m/m%-os habosítóarányú habmag SEM képe

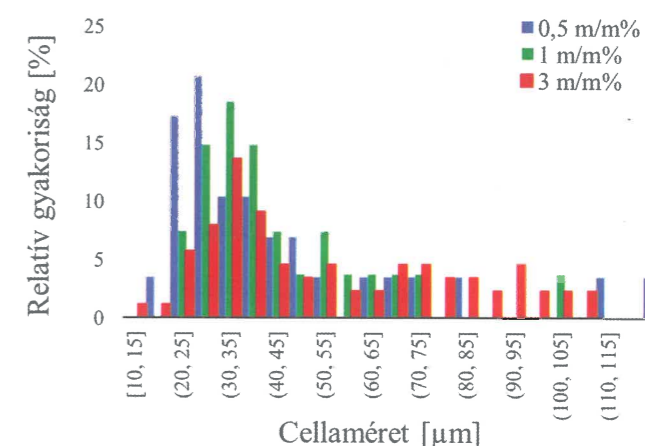


5. ábra: 3 m/m%-os habosítóarányú habmag SEM képe

felvettünk egy gyakorisági hisztogramot is, ahol a cellák méreteinek relatív eloszlását ábrázoltuk (7. ábra).



6. ábra: Átlagos cellaátmérő az egyes habosítószer arányok esetében



7. ábra: A habmagok relatív cellaméret eloszlása

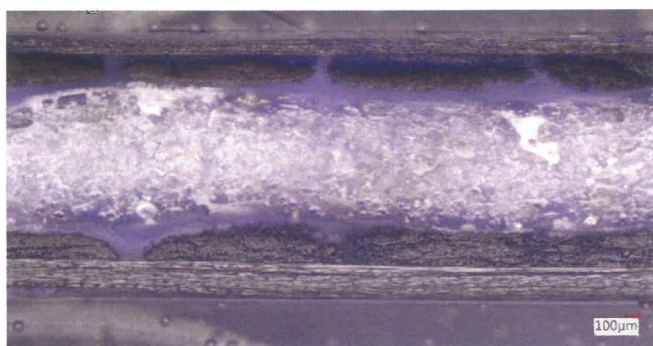
Az eloszlások jellege visszaadja a korábbi kutatásokban már többször megfigyelt log-normál eloszlásjellegét, ami a habképződésre jellemző ilyen gyártástechnológiák esetében [11]. Azonban az is látszik, hogy a habosítószer növelésével a cellaképződési göcök száma is nő, ami miatt több helyen a göcök összenőnek a habosodási folyamat közben, ezzel óriási cellákat létrehozva. Ez a szabad szemmel végzett vizsgálatokhoz képest nem csak a 3, hanem az 1 m/m%-os minták esetében is megindult. Ezek a cellák ronthatják a termék homogenitását, valamint potenciális hibahelyként is funkcionálhatnak az esetleges terhelések esetén. A teljes körű vizsgálatok miatt ezen hibák ellenére mindhárom habmagosított próbatestet a mechanikai vizsgálatokhoz.

3.2. SZENDVICSSZERKEZETEK HAJLÍTÓVIZSGÁLATA

A szendvicsszerkezetek gyártásakor a habmagok megfelelő kiszáritása kritikus tényezőnek bizonyult. Abban az esetben, ha nem sikerült teljes mértékben eltávolítani a nedvességet a habmagokból, nem alakult ki a megfelelő kötés a rétegek között. Ennek oka, hogy a bennük maradó nedvességtartalom miatt nem

zajlott le megfelelő mértékben a polimerizáció, így nem jött létre jó minőségű termék. A gyártás során a három féle szendvicsszerkezet mellett (8-10. ábra) habmag nélküli két-, illetve négyrétegű próbatestek is készültek.

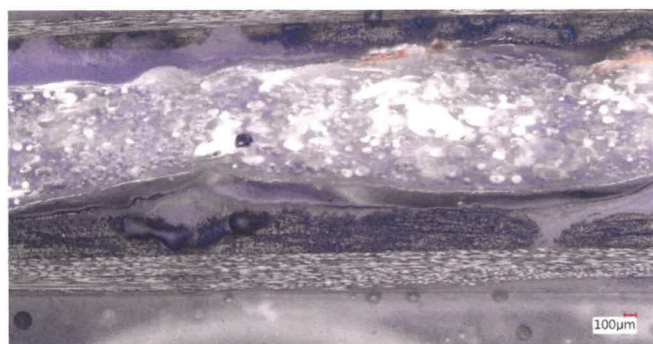
A négyretegű hajlító mérések célja a habmaggal rendelkező kompozit szendvicsszerkezetek összehasonlítása volt a kétrétegű és a négyrétegű kompozit mintákkal. A kétrétegű próbatestek kis mértékű hajlító igénybevétel hatására is könnyen deformálódtak, törés egyik mérés estében sem következett be, így határhajlító feszültséget számítottunk minden esetben. A kétrétegű próbatestek (11. ábra) a gyártás jellegéből adódóan nem szimmetrikusak, az egyik oldalukon egy extra mátrix réteg alakul ki. Ennek oka, hogy a két réteg erősítőszövet nem töltötte ki teljesen a szerszám formaüregét, így két elrendezésben is vizsgálatok



△ 8. ábra: 0,5 m/m%-os habosítószer aránnyal rendelkező habmag optikai mikroszkópos képe



△ 9. ábra: 1 m/m%-os habosítószer aránnyal rendelkező habmag optikai mikroszkópos képe



△ 10. ábra: 3 m/m%-os habosítószer aránnyal rendelkező habmag optikai mikroszkópos képe

Extra mátrix réteg
+/- 45°-os erősítőszövet
-/+ 45°-os erősítőszövet

△ 11. ábra: A kétrétegű referenciaminta felépítése (a szénövet vastagság ~0,6 mm rétegenként, extra mátrix réteg vastagsága ~0,8 mm)

ezeket a típusú mintákat. Egyik esetben az extra mátrix réteg alul, másodikkal felül helyezkedett el.

Az értékek azt mutatták (12. ábra), hogy jóval kedvezőbb eredményeket kapunk, ha ez a mátrix anyag többet a nyomott, nem pedig a húzott oldalon helyezkedik el. Az átlagos határhajlító feszültség és a hajlító rugalmassági modulusz utóbbi esetben 26 MPa, illetve 2,6 GPa-ra adódott, előbbiben elérhetünk 47 MPa, illetve 3,6 GPa-os értékeket is. A négyrétegű minták esetében, mivel azok szimmetrikusan helyezkednek el, nem volt szükség több elrendezés vizsgálatára. A vártaknak megfelelően ezeknél a mintáknál jóval magasabb, 330 MPa-os határhajlító feszültséget, 271 MPa-os hajlítószilárdságot, valamint 33 GPa-os hajlító moduluszt mértünk.

A szendvicsszerkezetek alkalmazásának oka, hogy a rendszerben elhelyezett mag megnöveli a szélső szálak közti távolságot, ezzel jobban kihasználva az erősítőszöveteket. Így minimális anyagköltség növekedéssel jobb mechanikai tulajdonságokat tudunk elérni, amennyiben megfelelő adhézió alakul ki a különböző rétegek között. A hajlítás során azt vizsgáltuk, hogy ez az adhéziós kapcsolat fennáll-e nagy mértékű terhelés esetén is a T-RTM technológiával gyártott minták esetében, és ha igen, milyen mértékű növekedést tudunk elérni a hajlítószilárdságban, illetve moduluszban a habmag nélküli, két- és négyrétegű mintákhoz viszonyítva. Sajnos a mérések során egyszer sem keletkezett törés, mindig delamináció volt a tönkremenetel elsődleges oka, így minden esetben a korábban használt határhajlító feszültséget, illetve hajlító moduluszt használtuk összehasonlítási alapul.

A 0,5 m/m% habosítószer tartalmú mintáknál már megmutatkoztak a habmag alkalmazásának előnyei. Annak ellenére, hogy ebben az esetben is csak két réteg erősítőanyag volt a rendszerben elhelyezve, az extra habmag segítségével a határhajlító feszültség 47 MPa-ról 94 MPa-ra, a hajlító rugalmassági modulusz pedig 3,6 GPa-ról 15,96 GPa-ra nőtt. Az 1 m/m%-os mintáknál ez még tovább, 114 MPa, illetve 18,95 GPa értékekre emelkedett. Mindkét esetben meg kell jegyezni, hogy volt olyan minta, ahol a mérés korai fázisában bekövetkezett a delamináció a nem megfelelő rétegek közötti adhézió miatt, így igen nagy szórás értékeket kaptunk ezen méréseknél. A 3 m/m%-os minták esetében az igen nagy mértékű szórás tovább nőtt, és ezek mellett a mechanikai tulajdonságok is jelentősen romlottak. A hajlító rugalmassági modulusz (5,95 GPa) ugyan valamivel a kétrétegű referencia minták értékeit meghaladta, azonban az átlagérték szórása nagy volt, így a különbség nem tekinthető szignifikánsnak. A határhajlító feszültség pedig alulmúlta a kétrétegű mintákat. Ezen mintáknál tapasztalhatóak voltak a cellaméret vizsgálatnál látott óriás cellák által létrehozott potenciális hibahelyek okozta hátrányok, valamint az adhézió sem volt megfelelő egyes minták esetében. Ha a kapott eredményeket összehasonlítjuk, megállapíthatjuk, hogy a habmag alkalmazása a hajlító

vizsgálatok esetén sikeresnek bizonyult, bár néhány esetben adhéziós problémák léptek fel, ami miatt az értékeket erős szórás terheli. Mindazonáltal, amennyiben ezt az adhéziós problémát valamilyen felületkezeléssel és/vagy hosszabb szárítási idővel sikerül kiküszöbölni, egyértelműen alkalmazható lehet a szendvicsszerkezetek előállítására a T-RTM technológia.

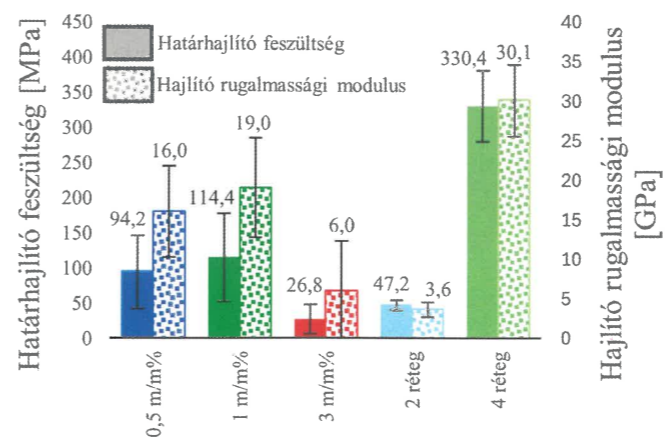
3.3. CHARPY-FÉLE ÜTVEHAJLÍTÓ VIZSGÁLAT

Egy habmagos struktúra esetében fontos, hogy megfelelő mértékben ellenálljon nem csak a folyamatos, hanem a hirtelen történő, nagy mértékű terheléseknek is. Sporteszközöknél például, ahol szintén alkalmaznak ilyen kialakításokat, fontos, hogy az esetlegesen felverődő kövek, hirtelen ütések ne tegyenek kárt a termékekben. Ezen típusú terhelés tesztelésére Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot végeztünk.

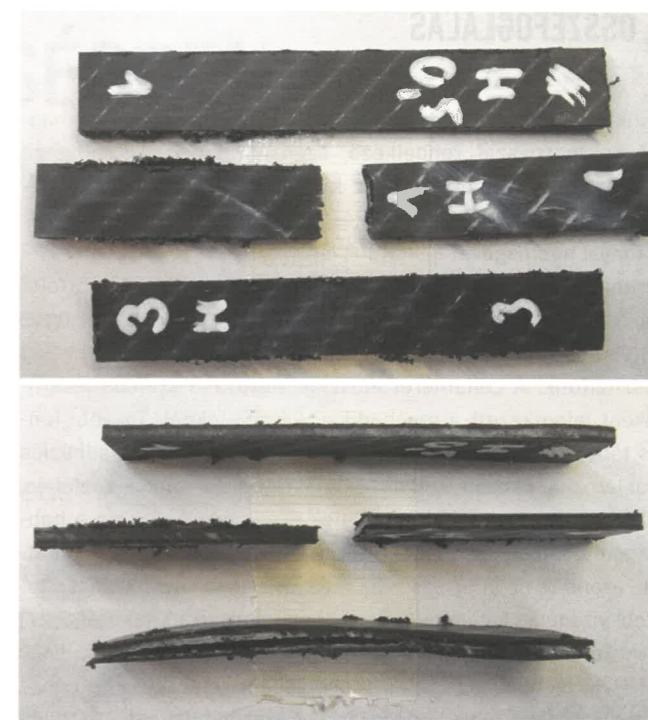
A vizsgálat során ebben az esetben is referenciaként szolgáltak a két- és négyrétegű habmag nélküli minták. A négyrétegű minták esetében teljes mértékű törés volt megfigyelhető, míg a kétrétegű mintáknál a mátrix többlet hatására valamivel szívósabb viselkedést figyeltünk meg. Ezekben az esetekben körülbelül 60%-ban történt törés, a maradék mintáknál csak nagymértékű maradék deformáció történt.

A 0,5 m/m%-os mintáknál szemmel látható javulást tudunk elérni. A 16 J-os ütőmunkával dolgozó kalapács nem tudta egyik esetben sem eltörni a próbatesteket. Az 1 m/m%-os habosítószer tartalmú minták vizsgálata során ezzel ellentétben minden esetben törés következett be. Ezt a cellaméret eloszlásból tudjuk megmagyarázni. Ha megvizsgáljuk a korábban bemutatott cellaméret eloszlást (7. ábra), megfigyelhetjük, hogy az 1 m/m%-os minták esetében már megjelentek azok a nagyméretű, több göcpontról összenövő cellák, amelyek potenciális hibahelyként jelentkezhetnek egy nagy mértékű hirtelen terhelés esetében. A 3 m/m%-os mintáknál egy újabb tönkremeneteli típus, a delamináció jelent meg. Emiatt megállapítható, hogy a rétegek közötti adhézió, ahogy azt a hajlító vizsgálatok nagymértékű szórása is bizonyította, nem volt megfelelő (13. ábra).

Ennek megfelelően a minták duktilitási indexe is jelentősen alacsonyabb volt, mint a 0,5 m/m%-os minták esetében. Ezeket a duktilitási indexeket hasonlítva össze a 14. ábra. Mivel a minták nem a szokásos módokon, hanem például delamináció útján



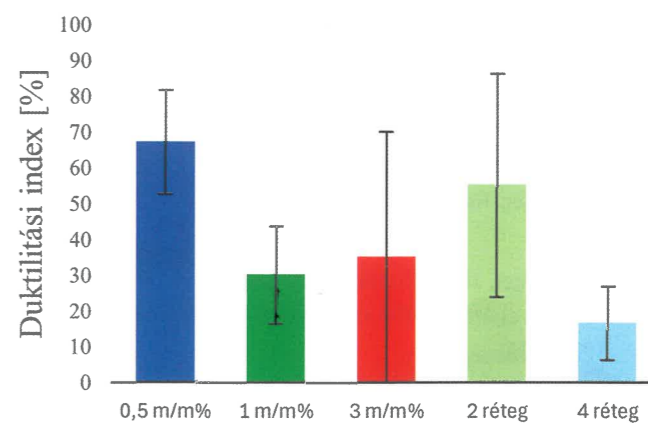
△ 12. ábra: Négyretegű hajlítóvizsgálatok eredményei



△ 13. ábra: Jellemző tönkremeneteli módok Charpy vizsgálat után, 0,5 m/m%-os (felső), 1 m/m%-os (középső) és 3 m/m%-os (alsó) habosítószer arányú mintáknál

vagy egyáltalán nem mentek tönkre, így az nem összehasonlítható minden típus esetén, ezen értékek a minták viselkedésére mutatnak rá, nem pedig a tönkremenetel módjára. A 0%-os értéket közelítő minták rideg, míg a 100%-ot közelítő minták szívós viselkedésre utalnak.

Az eredmények alapján elmondható, hogy bár a tönkremenetel hiánya miatt pontos értékeket nem tudunk meghatározni, az látható, hogy a hibahelyekkel nem rendelkező 0,5 m/m%-os minták esetében jelentősen sikerült növelni a szívósság mértékét. Ezt alátámasztja az is, hogy csak ezen mintáknál nem következett be tönkremenetel. Ezek alapján ismét elmondható, hogy ha az adhézió mértékét sikerül javítani minden minta esetében, a T-RTM technológia alkalmas lehet arra, hogy nagy volumenben, jó minőségben állítsunk elő PA6 mátrixú és habmagú kompozit szendvicsszerkezeteket.



△ 14. ábra: Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat eredményei

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során T-RTM technológiával gyártottunk PA6 habmaggal és mátrixszal rendelkező, szénszál erősítésű kompozit szendvicsszerkezeteket. Ehhez kidolgoztuk a gyártástechnológia lépéseit, mely során 0,5, 1 és 3 m/m% kémiai habosítószert aránnyal habmagokat állítottunk elő, majd ezek felhasználásával létrehoztuk a kompozit szendvicsszerkezeteket. Ezeket morfológiai és mechanikai vizsgálatoknak tettük ki. Referenciaként kettő, illetve négy réteg szénszövetet tartalmazó kompozit lemezeket használtunk. A cellaméret eloszlás változása kritikus jellemzőként jelentkezett a mechanikai vizsgálatoknál. További fontos tényező volt a maradó nedvességtartalom, amely adhéziós problémákat okozott, különösen a 3 m/m%-os minták esetében. A hajlító és ütvehajlító vizsgálatok eredményei alapján a habmaggal ellátott minták jobb mechanikai tulajdonságokat mutattak, azonban az adhéziós hiba teljes mértékű kiküszöbölése további vizsgálatokat igényel, hogy konzisztensen, jó minőségű termékeket lehessen előállítani. Mindezek alapján elmondható, hogy a T-RTM technológia ígéretes lehetőséget kínál olyan kompozit szendvicsszerkezetek tömeggyártására, ahol mind a mátrix, mind a habmag PA6 alapú.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásunk a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) FK 138501 számú pályázatának a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával és a KDP-IKT-2023-900-11-00000957/0000003 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg. Az RRF-2.3.1-21-2022-00009 azonosítószámú, Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium megnevezésű projekt a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósul meg.

A szerzők köszönetüket fejezik ki a TOOL-TEMP HUNGÁRIA Kft-nek a kutatásokhoz biztosított szerszámtemperálókért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Czikovszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2000).
- [2] Belowich, M. L.; Soddart, J. F.: Dynamic imine chemistry. Chem. Soc. Rev., 6, 2003-2024 (2012).
- [3] Sempenger, O. V.; Pomlényi, P.; Suplicz, A.: Felület-bevonatolási eljárás T-RTM technológiához. Polimerek, 7, 186-192 (2021).
- [4] Murray, J. J.; Roberta, C.; Gleich, K.; McCarthy, E. D.; Ó Brádaigh, C. M.: Manufacturing of unidirectional stitched glass fabric reinforced polyamide 6 by thermoplastic resin

transfer moulding. Materials and Design, 189 (2020).

- [5] Murray, J. J.; Allen, T.; Bickerton, S.; Bajpai, A.; Gleich, K.; McCarthy, E. D.; Ó Brádaigh, C. M.: Thermoplastic RTM: Impact Properties of Anionically Polymerised Polyamide 6 Composites for Structural Automotive Parts. Energies, 14, 5790 (2021).
- [6] Szebényi, G.; Tamás-Bényei P.; Ageyeva, I. S. T.; Osváth, Zs.; Pásztor, Sz.; Iván, B.; Karger-Kocsis, J.; Czigány, T.: ϵ -kaprolaktám alkalmazása T-RTM technológiákban. Erősített Műanyagok (2018).
- [7] Julien, J.; Bénézat, J.; Lafranche, E.; Quantin, J.; Bergeret, A.; Lacrampe, M.: Development of poly(lactic acid) cellular materials: Physical and morphological characterizations. Polymer, 53, 5885-5895 (2012).
- [8] Khan, T.; Acar, V.; Aydin, M. R.; Hülagü, B.; Akbulut, H.; Özgür Seydibeyoglu, M.: A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores. Polymer Composites, 41, 2355-2400 (2020).
- [9] Wei, K.; He, R.; Cheng, X.; Zhang, R.; Pei, Y.; Fang, D.: Fabrication and mechanical properties of lightweight ZrO₂ ceramic corrugated core sandwich panels. Mater. Des., 64, 91-95 (2014).
- [10] Li, S.; Jiang, S.; Gong, S.; Ma, S.; Yang, H.; Pan, K.; Deng, J.: Preparation Methods, Performance Improvement Strategies, and Typical Applications of Polyamide Foams. Ind. Eng. Chem. Res., 60, 17365- 17378 (2021).
- [11] Seibert, H. F.: Applications for PMI foams in aerospace sandwich structures. Reinf. Plast., 50, 1, 44-48 (2006).

SZÖVETSÉGBEN A MŰANYAGÉRT

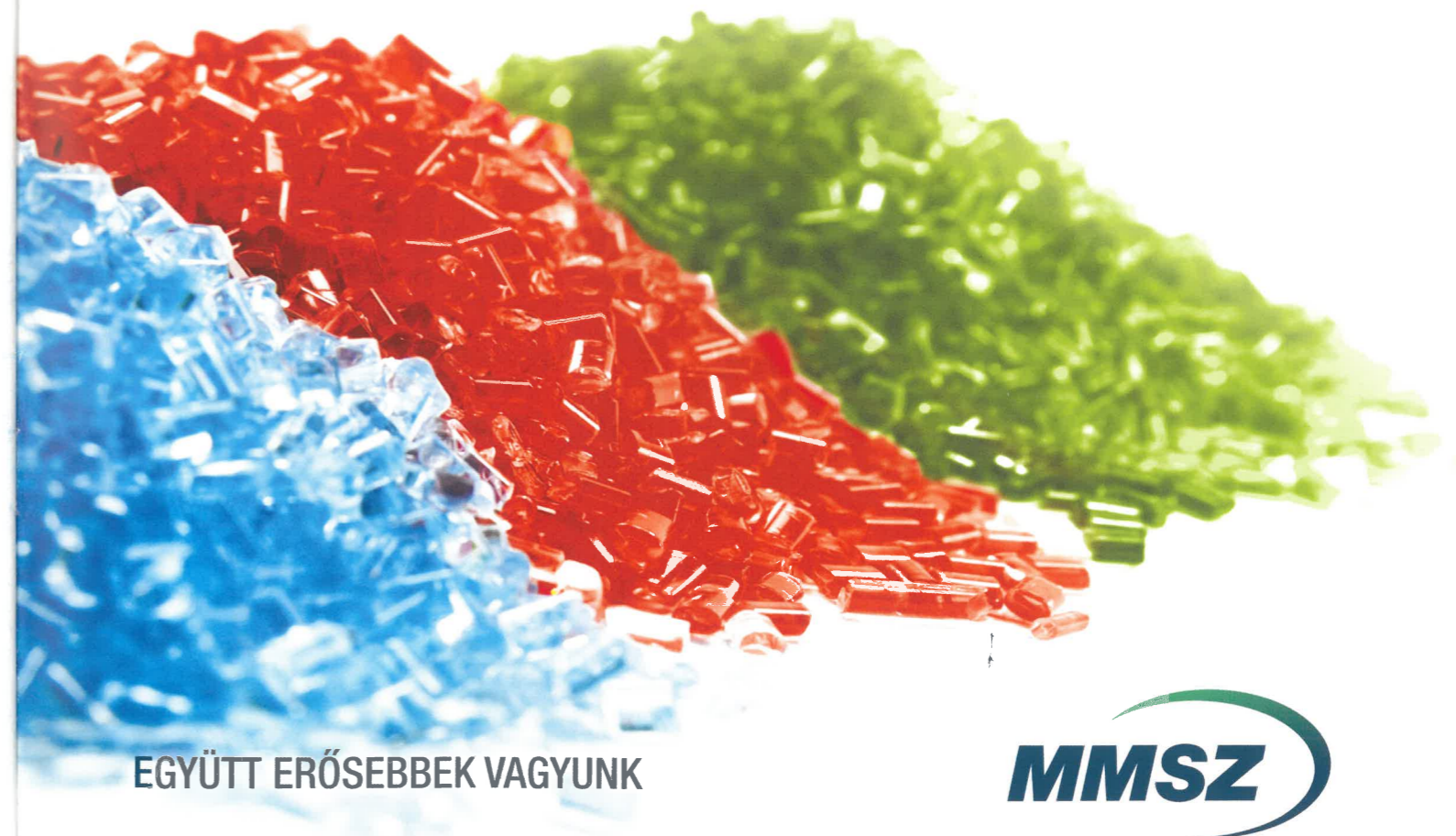
Szeretné közvetlenül
érvényesíteni cége érdekeit?

Bővítené üzleti lehetőségeit?

Ezen a fórumon is keresné
a megoldásokat gazdasági problémáira?

Szeretne a szakmai kihívásokra a piaci
résztevőkkel közös megoldást találni?

**LEGYEN A TAGUNK ÉS
MINDEZT MEGTEHETI!**



EGYÜTT ERŐSEBBEK VAGYUNK

