

Bazaltszál-erősítésű fröccsöntött poliamid mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

Deák Tamás** – Kovács József Gábor* – Szabó Jenő Sándor**

Abstract

Study of mechanical properties of basalt fibre reinforced polyamide. We have been examining the moulding shrinkage and the mechanical properties of basalt fibre reinforced injection moulded polyamide 6. Basalt is well known as a rock found in virtually every country around the world. It is mostly used by the building industry, but it can also be made into fine fibres. The basalt fibres, which were used for our experiments, have a special property: on the ends of the fibres there are small spheres, which have three to ten times the diameter of the fibre. Some of these spheres brake off the fibres during processing. These spheres behave like fillers and influence both the mechanical properties of the composite. For our experiments we made composites with 30, 45 and 60 w% fibre content. We used two types of basalt fibres: one of them was the original, while the other one was washed, which means that most of the broken spheres were removed from it. Altogether we made six different materials. We did not add any adhesive or other additives to the composites. The main purpose of our examination was to find out the effect of using washed basalt fibres. We examined the mechanical properties through tensile, flexural, notched Charpy and SEN-T tests. The results show that washing the basalt fibres had an advantageous effect on all mechanical properties of the composite. The stiffness and strength of the basalt fiber reinforced PA 6 is better than that of the non-reinforced nylon, but its toughness does not meet the requirements of the industrial applications. Its main reason is the lack of the adhesion promoter additives.

Bevezetés

A műanyagok részecskéikkel, szálakkal vagy más megjelenési formájú természetes és mesterséges anyagokkal való töltése számos cél érdekében lehetséges, mint például valamilyen mechanikai tulajdonság (szilárdság, merevség, ütésállóság, kúszási hajlam) javítása, a zsugorodás csökkentése, kopásállóság, hőalak tartósság javítása, lángállóság, villamos vezetőképesség vagy antisztatikus viselkedés elérése, hőtágulási együttható csökkentése. A töltő- és erősítőanyagok közül a szálakat elsősorban a mechanikai tulajdonságok javítására alkalmazzák. A kompozittechnika új anyagfajta – az általánosan elterjedt üvegszál sok területen helyettesíteni képes – bazaltszál, amelynek néhány lényeges tulajdonságáról még viszonylag keveset tudunk. Ezek közé tartozik a bazaltszál-erősítés hatása a fröccsöntött műszaki műanyagok mechanikai tulajdonságaira.

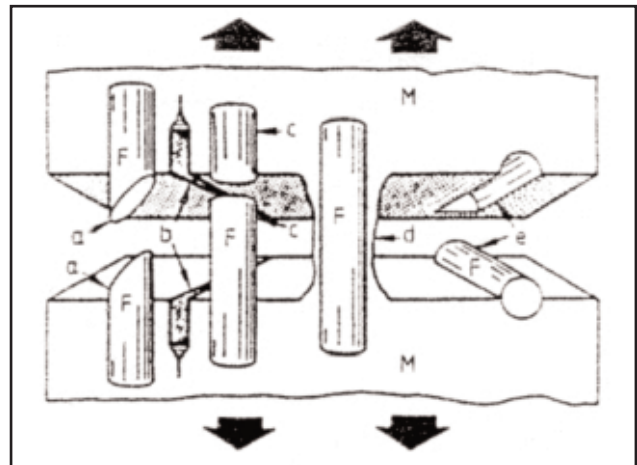
A bazaltszál, mint a fröccsöntött hőre lágyuló műanyagok erősítőanyagát, már sokrétű vizsgálatoknak vetették alá, de elsősorban polipropilén mátrixba ágyazva. A poliamidot eddig ritkán próbálták mátrixként alkalmazni, annak ellenére, hogy jobb eredmények várhatók tőle. A poliamid önmagában jobb mechanikai és hőállósági tulajdonságokkal rendelkezik, mint a polipropilén. Ugyanilyen fontos szempont az is, hogy a poliamid és a bazalt egyaránt poláros molekulaszervezetű anyagok, ezért az általuk alkotott kompozitban könnyebb megvalósítani a megfelelő határfelületi kapcsolódást, illetve adhéziót javító adalékok nélkül is a tulajdonságok bizonyos mértékű javulása várható. Vizsgálataink célja a bazaltszállal erősített, fröccsöntött, poliamid mátrixú kompozit mechanikai tulajdonságainak felmérése volt több, különböző szálkoncentráció esetén. Ezzel kideríthető, hogy a bazaltszál önmagában (felületkezelés

nélkül) képes-e a jellemzők javítására, azaz hogy „mihez képest” lehetséges a tulajdonságok további javítása.

A polimer kompozitok fő jellemzői

A kompozit többfázisú, összetett szerkezeti anyag, amelyben a mátrix és a nagy szilárdságú erősítőanyag között jó adhéziós kapcsolat alakul ki, és az tartósan fennmarad. A kompozitokat olyan szerkezeti anyagként foghatjuk fel, amelyeknél az egyes alkotóelemek (a mátrix és az erősítőanyag) meghatározott feladatokat látnak el. A merevebb erősítőanyag az igénybevételtől függően húzásra vagy nyomásra van terhelve, míg a lágyabb mátrix elsősorban a terhelésátvitelt, másodsorban az erősítőanyaggal való együttműködést biztosítja és védi az erősítőszálakat. Ez a hatékony funkciómegosztás akadályozza meg a kompozit anyagból készült szerkezet gyors tönkremenetelét. Azért előnyös polimer kompozitokat alkalmazni, mert az azt alkotó komponensek igen eltérő tulajdonságúak lehetnek, de a teljes rendszer egyesítheti ezen eltérő tulajdonságokat. A polimer kompozitok mechanikai tulajdonságai az erősítőanyag és a mátrix jellemzői mellett a közöttük fellépő határfelületi kölcsönhatásoktól is függenek. Mind a mechanikai, mind pedig a termikus hatások következtében fellépő feszültségeket a szál és a mátrix között a határfelületi réteg közvetíti. Az adhézió mellett a tapadási felület nagysága is nagyon lényeges, ezért törekedni kell arra, hogy az erősítőanyag fajlagos felülete minél nagyobb legyen.

A kompozitok mechanikai terhelés hatására létrejövő tönkremenetelének jellegzetes formái a 1. ábrán láthatók. Ezek közül a szálszakadás a legkedvezőbb, mert az lehetővé teszi az erősítőszál szakítószilárdságának teljes kihasználását. Ha a kompozit a szálszakadás bekövetkezése előtt tönkremegy, az azt jelenti, hogy valamilyen hiányosság fedezhető fel a szerkezetben, mint például a túlságosan rövid szálak, vagy az erősítőanyag és a mátrix közötti tapadás elégtelen volta.



1. ábra. Jellemző tönkremeneteli formák (M: mátrix, F: erősítőszál, a: szálszakadás, b: mátrix tépődés, c: szálkihúzóadás, d: mátrix deformáció, e: rétegelválás) [1]

A bazaltszál

A bazalt igen gyakori, vulkanikus eredetű felszíni kőzet. Építőanyagként ösidők óta alkalmazzák. 1350 és 1700 °C közötti hőmérsékleten olvad meg, és hirtelen lehűtve majdnem teljesen amorf, üveges formában szilárdul meg. Lassú lehűtése egy többé-kevésbé kristályos, összetett szerkezetű ásványt eredményez, átlagos sűrűsége 2,7 g/cm³. Igen széles hőmérséklettartományban, -200-tól +600 °C-ig felhasználható.

* A BME Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék tanársegédje, ill. ** doktorandusza

Ennél magasabb hőmérsékleten az anyagban szerkezeti változások következnek be. Vegyi összetételét tekintve legfontosabb alkotóelemei a SiO₂, az Al₂O₃, a CaO, az MgO és a FeO. A bazalt, kémiai összetétele szempontjából, közeli rokonságban áll az üveggel. Az erősítőszálak gyártására használt E és S típusú üveggel való összehasonlítása az 1. táblázatban látható.

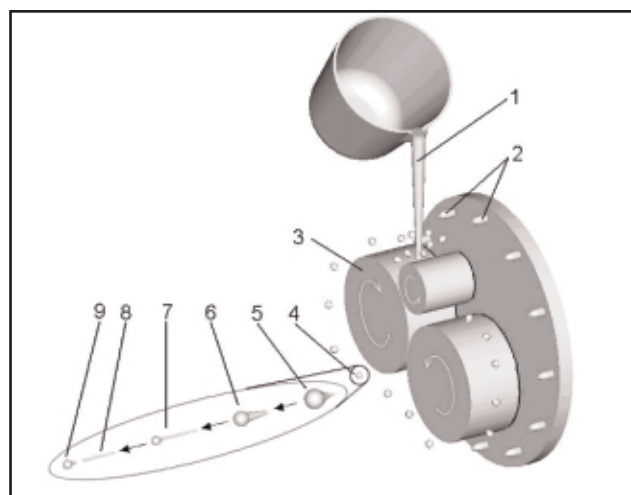
1. táblázat: A bazalt, az E és az S üveg átlagos összetétele, tömegszázalékban [4]

Vegyület (%)	E-üveg	S-üveg	Bazalt
SiO ₂	52–56	65	51,6
Al ₂ O ₃	12–16	25	18,2
CaO	16–25	–	5,2
MgO	0–5	10	1,3
B ₂ O ₃	5–10	–	–
Na ₂ O	0,8	0,3	6,4
K ₂ O	0,8	0,3	4,5
TiO ₂	–	–	1,2
Fe ₂ O ₃	–	–	4
FeO	–	–	2,1

A bazaltot régóta dolgozzák fel bazaltgyapottá, hő- és hangszigetelési célból. Általánosan használják épületek tetőszerkezetének, ajtóknak és csöveknek a szigetelésére, de kipufogódob betéteket is készítenek belőle. Ezeken a felhasználási területeken a bazaltnak elsősorban a jó rezgéscsillapító, vegyileg közömbös, korrózióálló, éghetetlen, gyakorlatilag korlátlan élettartamot adó tulajdonságait használják ki.

A bazaltszál kompozit-erősítőanyagként való alkalmazásának lehetősége először a volt Szovjetunióban merült fel egy úrhajózással kapcsolatos kutatási programban a nyolcvanas évek elején. Ma is Oroszországban és Ukrajnában állítják elő a legnagyobb mennyiségben a kimondottan erősítőanyagként szánt bazaltszálat [5,6].

A vizsgálatainkhoz használt bazaltszálat a tapolcai székhelyű Toplan Kft. gyártja. Az alkalmazott eljárás a svéd Junkers-technológiát részint olasz, részint saját fejlesztéssel ötvözve alakult ki. A lényege, hogy a körülbelül 1580 °C-os olvasztási hőmérsékleten dolgozó gáztüzelésű kádkemencéből kikerülő olvadékat a három centrifugafejés, vízszintes tengelyű szálazó-berendezésre vezetik (2. ábra). A felső, kisebb henger a gyorsítóhenger, ennek feladata az olvadék felgyorsítása a lejjebb látható szálazóhengerek számára. A fejekre tapadt láva egy része a centrifugális erő hatására lerepül és a fúvókákból rábocsátott nagy se-



2. ábra. Junkers-féle szálgyártási technológia vázlata [7]

1: megolvasztott bazaltkő, 2: levegő fúvókák, 3: szálazó hengerek, 4: cseppek, 5–7: szálképződés folyamata, 8: szál, 9: szálfej

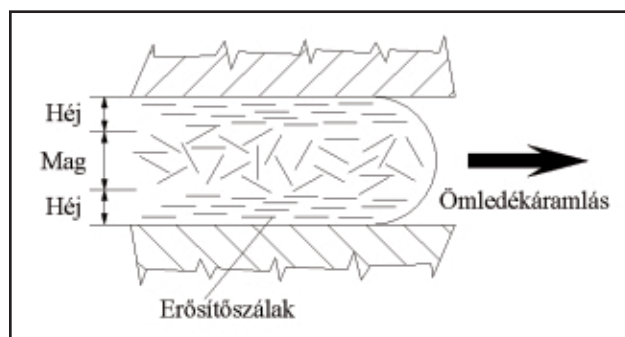
bességű levegőáram a viszkozus folyadékból szálat húz. Ez a szál a hirtelen hőmérséklet-változás hatására üveges fázisú anyaggá szilárdul, s ennek során a szálak végein, azok hosszától függően, kisebb-nagyobb szálfejek maradnak. A szálfejek nagy része még ülepítéskor letörlik, azonban a kisebbek a szálakon maradnak. A kompozitban a szálon maradó szálfejek szívósság-növekedést okoznak, mivel akadályozzák a szálak kihúzóását. A letört szálfejek viszont, gyenge helyként viselkedve, repedések kiindulási pontjai lehetnek. A szálazás során változtatni lehet az olvadék összetételét (általában 5–10% dolomitot tartalmaz) és hőmérsékletét, a szálazó-berendezés egyes fejeinek fordulatszámát és a lefúvási sebességet. A szálazó-berendezés kapacitása 1–3 tonna/óra [7]. A vizsgálatainkhoz használt bazaltszálak szálátmérője 6–20 μm, átlagos szálhosszúsága 5 mm körül volt.

Szálerősítésű műanyagok fröccsöntése

A hőre lágyuló műanyagokat természetes (kender, juta, len, gyapjú, kókusz), vagy üveg-, szén-, kerámia-, aramid- és acélszálakkal erősíthetik. A legelterjedtebb szálajta az üvegszál, viszonylagos olcsóságának köszönhetően. Mátixanyagként az erősítőszálakat jól nedvesítő, a szálakkal igen jó tapadást biztosító poliamidot és az olcsó polipropilént részesítik előnyben. A szálerősítésű műanyagok fröccsöntése során a szálvégek forgácsoló hatást fejtenek ki, emiatt erősen koptatják a plasztikáló henger falát, a csigadugattyú és a szerszám felületét, valamint a fúvókát. A koptató hatást az erősítőszálak száma és orientációja, valamint az ömledék viszkozitása határozza meg. A szálerősítésű műanyagok fröccsöntéséhez rendkívül kopásálló plasztikáló hengert és csigát kell alkalmazni.

A szálerősített hőre lágyuló műanyagok tulajdonságait alapvetően a szálak hosszúsága befolyásolja. A rövid szálakkal erősített műanyagokban a szálak hossza 0,2–0,4 mm. A plasztikálás és a befröccsentés során a csiga meneteiben és a szerszámokban erőteljesen töredeznék a szálak, átlagos hosszúságuk ekkor csökken 0,2–0,4 mm-re. Ez azonban jóval a maximális szilárdságot biztosító kritikus szálhossz alatt van, azaz a rövid szálakat eredményező fröccsöntés nem aknázza ki az anyagban rejlő lehetőségeket. Az optimális szálhosszúság mintegy 3–6 mm, az ilyen méretű szálakkal erősített anyagokat hosszúszálasnak nevezik. A hosszúszal-erősítésű műanyagok szilárdsága 120%-kal is meghaladhatja a rövidszál-erősítésű műanyagokét, de az ennél hosszabb szálak gyakorlatilag már nem növelik tovább az anyag szilárdságát. A hosszúszálas kompozitok fröccsöntése azonban speciális berendezést és technológiát igényel, ami nagymértékben eltér a hagyományos fröccsöntés módszereitől.

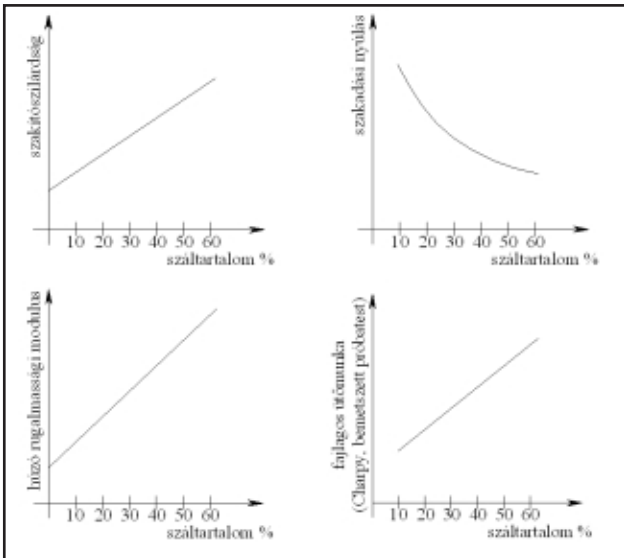
Technológiai szempontból meghatározó jelentőségű az orientáció és a mag-héj szerkezet kialakulása. A szerszámüreg kitöltése során a műanyagömledék egy része a fal mellett igen gyorsan megdermed, ebből alakul ki a héj, míg a szerszám felületétől távolabb eső, ún. mag részben lassabban dermed meg, már csak a szerszámüreg teljes kitöltése után. A héjban az erősítőszálak gyakorlatilag a folyás irányába rendeződnek, míg a magban általában véletlenszerűen, esetenként pedig a folyási irányra merőlegesen helyezkednek el (3. ábra). A termékben létrejövő, a folyási irányhoz viszonyított, átlagos szálorientációt a mag és a héj vas-



3. ábra. A mag-héj szerkezet kialakulása

tagságának aránya határozza meg. Minél nagyobb a befröccsentési sebesség, azaz minél gyorsabban áramlik az ömledék, annál kisebb lesz a héj vastagsága, ennélfogva annál kisebb lesz az átlagos szálorientáció.

Irodalmi adatok alapján a száltartalom hatását a mechanikai tulajdonságokra a 4. ábrán látható diagramokban lehet összefoglalni [3, 8–10]. A száltartalom növelése közel lineárisan növeli a merevséget, de ez együtt jár a szakadási nyúlás csökkenésével. A szilárdság és a hornyolt próbatesteken mért fajlagos ütőmunka szintén lineáris növekedést mutat. A termék falvastagsága is befolyásolja a merevséget és a szilárdságot: általában minél nagyobb a falvastagság, annál vékonyabb a héj a maghoz képest, így annál kisebb a szálorientáció. Ez a húzó és a hajlító rugalmassági modulus, valamint a szakítószilárdságot is csökkenti. A szálhossz és a száltartalom között is van összefüggés: a fröccsöntés során a szálak közötti kölcsönhatás is száltöredésezést okoz, így a száltartalom növelése az átlagos szálhosszúság csökkenésével jár.



4. ábra. A szálerősítés hatása a mechanikai tulajdonságokra

Mechanikai vizsgálatok

A vizsgálatokhoz három különböző száltartalommal, összesen hatféle alapanyagot állítottunk elő. A mátrix a Bayer AG által gyártott Durethan B30S márkajelű PA 6 volt. Erősítőanyagként a Toplan Kft. által gyártott bazaltszálakat használtuk, kétféle formában: egyrészt eredeti formájában, másrészt pedig mosott állapotban. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a szálhalmazt vízzel átmosva, a szálvégekről letört szálfejek nagy részét eltávolítottuk. Vagy is, a mosott bazaltszál alapanyagokban, azonos száltartalom mellett, lényegesen kevesebb szálfej van. Vizsgálataink egyik fő célja az volt, hogy megállapítsuk, milyen hatása van a bazaltszál kimosásának, mert noha ettől kedvező változások várhatók, a mosás időigényes technológia, emellett jelentősen növeli a költségeket. Mindkét szálajtával 30, 45 és 60 tömegszázalék szálát tartalmazó granulátumot készítettünk (2. táblázat). A szál bekeverését Brabender Plasti-Corder PL 2100 típusú, kétcsigás keverőextruderrel végeztük.

2. táblázat: A bazaltszál keverékek fő adatai és jelölése

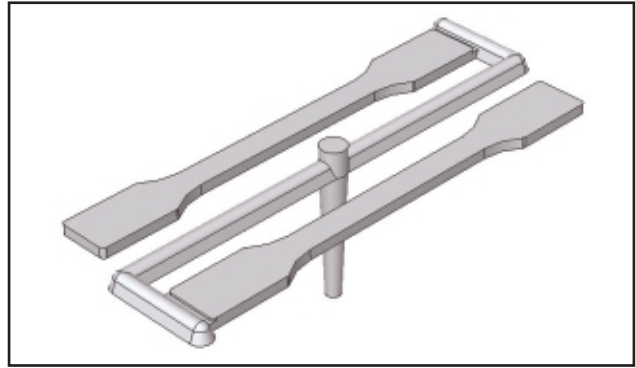
Sorszám	Bazaltszál tartalom tömeg%	Bazaltszál típusa	Jelölés
1	30	tisztított	T 30
2	45	tisztított	T 45
3	60	tisztított	T 60
4	30	nem tisztított	N 30
5	45	nem tisztított	N 45
6	60	nem tisztított	N 60

Összehasonlítás céljából az erősítetlen mátrixanyagból (jele: PA6 vagy töltetlen) is készítettünk próbatesteket. A próbatesteket kétfézes szerzámba fröccsöntöttük, Arburg 270 C 500–250 típusú fröccsöntőgéppel.

A mechanikai és törésmechanikai tulajdonságok összehasonlíthatósága érdekében valamennyi anyagmintán szakító-, hárompontos hajlító-, valamint bemetszett próbatestekkel úgy hajlító és törésmechanikai szakító- (SEN-T) vizsgálatokat végeztünk.

Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokat az MSZ EN ISO 527 szabvány előírásai alapján végeztük. A téglalap keresztmetszetű próbatest szabványos kialakítása az 5. ábrán látható. A mérés eredményeként kapott erő-elmoz-



5. ábra. Szabványos szakító próbatest

dulás ($F-\Delta l$) görbéből határoztuk meg a feszültség-relatív nyúlás ($\sigma-\epsilon$) görbét. A σ_{MAX} húzószilárdság az F_{MAX} (N) maximális erő és a próbatest kiindulási keresztmetszetének a hányadosa:

$$\sigma_{MAX} = \frac{F_{MAX}}{A_0} \quad (1)$$

Az ϵ_B szakadási nyúlás a szakadás pillanatában mérhető fajlagos nyúlás. Ez a mennyiség sokat elárul az adott anyag szívósságáról: általában minél nagyobb a szakadási nyúlás, annál kevésbé rideg és törékeny a vizsgált anyag. A méréseket Zwick Z020 típusú univerzális szakítógépen végeztük, 100 mm befogási hosszal és 2 mm/perc szakítási sebességgel. Minden anyagból 5 próbatestet vizsgáltunk, majd ezeket a húzószilárdság szerint rangsorolva, a sorból legnagyobb és legkisebb értéket elhagyva, a fennmaradó 3 próbatest jellemzőinek átlagát és 95%-os konfidencia intervallumra vonatkozó szórását számítottuk ki. A szakítógörbék alapján minden anyagra kiszámítottuk a húzószilárdságot, a rugalmassági modulusot és a szakadási nyúlást. Az eredmények a 3. táblázatban foglaltuk össze. Az erősítetlen poliamid próbatesteket 35% fajlagos nyúlásig nyújtottuk, s noha ezalatt elérték az erőmaximumot, nem szakadtak el. Irodalmi adatok szerint a PA 6 szakadási nyúlása 50% körül van [2].

3. táblázat: A szakítóvizsgálatok eredményei

Anyagtípus	Húzószilárdság σ_{MAX} (MPa)	Rugalmassági modulus E (GPa)	Szakadási nyúlás ϵ_B (%)
T30	59,6±1,49	4,54±0,12	3,32±0,33
T45	64,3±0,16	6,12±0,04	2,01±0,01
T60	67,7±0,86	7,57±0,23	1,57±0,08
N30	48,1±0,21	4,03±0,02	4,08±0,21
N45	51,0±0,85	5,42±0,10	1,63±0,02
N60	52,9±0,34	7,18±0,07	1,12±0,01
PA 6	58,1±0,13	2,07±0,05	nem szakadt

Értékelve az eredményeket a következők állapíthatók meg: A száltartalom és a szilárdsági tulajdonságok közötti összefüggések menete megegyezik a szálerősített anyagokra általában jellemzővel (4. ábra). A

tisztított bazaltszállal erősített anyagok húzószilárdsága és rugalmassági modulusa – a kisebb szálféjtartalom következményeként – felülmúlja a nem tisztítottal erősített anyagokét, viszont az eltérő szálféjtartalom a szakadási nyúlást nem befolyásolja nagy mértékben. Az erősítetlen poliamidhoz képest a tisztított bazaltszál-erősítés növeli az anyag húzószilárdságát, viszont a nem tisztított bazaltszál-erősítés gyengíti a poliamidot. Ez a száltartalomtól függetlenül igaz. A poliamid rugalmassági modulusát a 30%-os bazaltszál-erősítés a kétszeresére növelte, a további növekedés pedig a száltartalom függvényében közel lineáris.

Összességében elmondható, hogy a bazaltszálás kompozitok szilárdságának és merevségének a száltartalommal való összefüggése összhangban van a szálerősítésű kompozitokra általánosan érvényes törvényszerűségekkel. A mosott bazaltszál megnövelte a poliamid húzószilárdságát (mintegy 2,6–16,5%-kal), ezzel szemben a nem mosott bazaltszál csökkentette a szilárdságot. Ez annak a következménye, hogy alapvetően csak a sima és fejes szálak növelik a szilárdságot, míg a leszakadt szálféjek – amelyek kis fajlagos felületen tapadnak a mátrixhoz – gyenge helyként viselkedve csökkentik a teherviselő keresztmetszetet. Tönkremenetelkor a poliamid gyakran a szálféjek mentén válik szét, ami sok esetben szabad szemmel is megfigyelhető a töréfelületen. Mivel a szálféjek gyenge adhéziójuk ellenére megnövelik a merevséget, a rugalmassági modulus a mosott és a nem mosott bazaltszálás anyag esetében is meghaladja a mátrixanyagét. A bazaltszál kimosása a húzószilárdságra és a merevségre egyaránt kedvező hatást gyakorol.

Hárompontos hajlítóvizsgálat

A hárompontos hajlítóvizsgálatokat az MSZ EN ISO 178 szabvány alapján, Zwick Z020 típusú univerzális terhelőgépen végeztük, a következő paraméterekkel: vizsgálati sebesség: $v = 2$ mm/perc, alátámasztási távolság: $L = 64$ mm, próbatetest vastagsága: $h = 4$ mm, próbatetest szélessége: $b = 10$ mm, határlehajlás: $s = 6,4$ mm. A mérésekhez ugyanolyan próbatesteket használtunk, mint a szakítóvizsgálatokhoz. Minden anyagból 5 próbatestet vizsgáltunk, majd ezeket a hajlítószilárdság szerint rangsorolva, a sorból legnagyobb és legkisebb értéket elhagyva, a fennmaradó 3 próbatest jellemzőinek átlagát és 95%-os konfidencia intervallumra vonatkozó szórását számítottuk ki. Az egyes anyagok σ_{fM} hajlítószilárdsága és E_f hajlítómodulusa a 4. táblázatban látható. A maximális (törési) lehajlásoknál az s azt jelenti, hogy a próbatestek a határlehajlásig nem törtek el.

4. táblázat: A hárompontos hajlítóvizsgálat eredményei

Anyagtípus	Hajlítószilárdság σ_{fM} (MPa)	Hajlítómodulus E_f (GPa)	Max. lehajlás s_{max} (mm)
T30	98,22±0,39	4,06±0,01	s
T45	101,42±0,29	5,78±0,07	4,8
T60	106,47±0,33	8,51±0,11	3,2
N30	80,12±0,51	3,49±0,01	s
N45	87,85±0,37	5,16±0,03	5,2
N60	86,71±0,12	7,85±0,11	2,9
PA 6	66,90±0,24	2,05±0,01	s

A bazaltszál kimosásának előnye mind a hajlítószilárdság, mind a hajlítómodulus tekintetében megmutatkozik. A hajlítómodulus megközelítőleg lineáris növekedése a száltartalom függvényében megfelel az általános tapasztalatoknak [3, 8]. A nem tisztított bazaltszálás anyag hajlítószilárdsága szintén növekszik a száltartalommal, azonban az N60 valamivel kisebb értéket mutat, mint az N45. Ez a 60%-os (nem mosott bazaltszálás) rendszer erős túltelítettségére enged következtetni. A hajlítószilárdságot – a húzószilárdsággal szemben – a bazaltszál alkalmazása minden esetben megnövelte az erősítetlen poliamidhoz képest, de ez általában a kevésbé jó minőségű töltő- és erősítőanyagokkal is megtörténik, így ebből nem lehet messzemenő következtetéseket levonni.

Az eredményeket összefoglalva a hajlítóvizsgálattal kapcsolatban a

következőket állapíthatjuk meg: a bazaltszálás kompozitok közül hajlítószilárdság és hajlítómodulus szempontjából egyaránt a T60 bizonyult a legjobbknak. A tisztított bazaltszál előnye szembevetendő: a T30 szilárdsága nagyobb, mint a legnagyobb szilárdságú, nem mosott bazaltszálás anyagé. Az anyagok szívósságát jól jellemzi, hogy amíg a 45 és 60%-os bazaltszál-erősítésű kompozit próbatestek a vizsgálat során eltörtek, addig a 30%-os látható változás (törés, repedés) nélkül elérte a határlehajlást.

Ütve hajlító vizsgálat

A Charpy-féle ingás ütőműves vizsgálat a dinamikus mechanikai vizsgálatok közé tartozik. Az inga helyzeti energiája a törés pillanatában átalakul mozgási energiává, így a törés előtti és utáni mozgásállapot összehasonlításából megállapítható a próbatest által elnyelt energia. Ezt a próbatest keresztmetszetére vonatkoztatva kapjuk a fajlagos ütőmunkát. Bemetszett próbatesteken végzett ütővizsgálat esetén az a_{cN} (kJ/m²) fajlagos ütőmunkát az alábbi egyenlettel kell kiszámítani:

$$a_{cN} = \frac{E_{total}}{h \cdot (b - a)} \quad (2)$$

ahol E_{total} (J) a próbatest által felemészített teljes energia, b (mm) a próbatest szélessége, h (mm) a próbatest vastagsága és a (mm) a bemetszés mélysége.

A méréseket az ISO 179 1:2000 (E) szabvány alapján végeztük, Ceast DAS 8000 típusú ütőművön, 15 J-os kalapáccsal. Minden anyagból 5 szabványos próbatestet használtunk fel. Ezeket 45°-os, 1-től 5 mm-ig mm-enként növekvő mélységű bemetszésekkel láttuk el. A bemetszések lekerekítési sugara 0,25 mm, a próbatestek megtámasztási távolsága 62 mm volt. Mindegyik próbatestre kiszámítottuk az a_{cN} fajlagos ütőmunkát. Ebből minden anyagtypusnál elhagytuk a legkisebb és a legnagyobb értéket és kiszámítottuk a fennmaradó 3 átlagát és a 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó szórását. Az eredményeket az 5. táblázatban foglaltuk össze.

5. táblázat: Az ütve hajlító vizsgálat eredményei

Anyagtípus	Fajlagos ütőmunka a_{cN} (kJ/m ²)
T30	3,01±0,1
T45	4,18±0,19
T60	4,08±0,08
N30	3,28±0,2
N45	3,79±0,08
N60	3,69±0,1
PA 6	6,26±1,89

A fajlagos ütőmunka növekedése a száltartalom függvényében általánosan jellemző a szálerősítésű műanyagokra. A 60% száltartalmú kompozitok fajlagos ütőmunkája ezzel szemben körülbelül egyenlő a 45%-osával, illetve némileg alacsonyabb. Ennek oka a 60%-os kompozit túltelítettsége. A bazaltszál tisztításának előnye megmutatkozik a 45 és a 60% bazaltszállal erősített poliamidnál, ezzel szemben a 30%-osnál a nem mosott bazaltszál eredményez nagyobb ütőmunkát. A bazaltszálás anyagok között a legjobb eredményt a tisztított 45%-ossal értük el. A bazaltszállal erősített anyagok között nincs jelentős különbség, a legnagyobb (T45) és a legkisebb érték (N30/60) között az eltérés mindössze 32%.

Statikus törésmechanikai vizsgálat

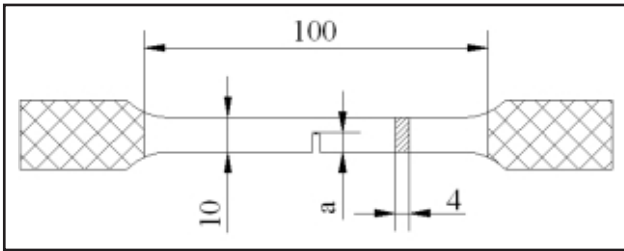
A statikus törésmechanikai vizsgálatokat a 6. ábrán látható SEN-T próbatesteken végeztük. A SEN-T próbatest abban különbözik a szakítópróbatesttől, hogy a közepén egy 2-4 mm mélységű, keresztirányú éles bemetszés található. A törésmechanikai vizsgálatok és így a SEN-T vizsgálat alapján meghatározható legfontosabb mérőszám a K_{IC} kritikus feszültségintenzitási tényező, amely a repedésterjedésre való hajlam mérőszáma és a repedéscsúcs környezetében jellemzi a feszült-

ségmezőt. A kritikus feszültségintenzitási tényezőt a próbatetek egyenletes sebességű szakítóvizsgálata során regisztrált erő–elmozdulás ($F-\Delta$) görbéhez tartozó F_{MAX} (N) maximális erőérték alapján számítotuk ki az alábbi egyenlettel [11]:

$$K_C = \frac{F_{MAX}}{h \cdot b} \cdot \sqrt{a} \cdot f(a/b) \quad (3)$$

ahol h (mm) a próbatest vastagsága, b (mm) a próbatest szélessége, a (mm) a bemetszés mélysége, az $f(a/b)$ pedig a geometriai korrekciós tényező, amely az alábbi egyenlet alapján számítható:

$$f(a/b) = 1,99 - 0,41(a/b) + 18,7(a/b)^2 - 38,48(a/b)^3 + 53,85(a/b)^4 \quad (4)$$



6. ábra. SEN-T próbatest geometriája

A méréseket Zwick Z020 típusú univerzális terhelőgépen, 2 mm/min szakítási sebességgel, a szakítóvizsgálattal megegyező elrendezéssel végeztük. Minden anyagból 5 próbatestet vizsgáltunk, majd ebből a legkisebb és a legnagyobb értéket elhagyva, a fennmaradó három átlagát és 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó szórását számítotuk ki. Az eredményeket a 6. táblázatban foglaltuk össze.

6. táblázat: A SEN-T vizsgálat eredményei

Anyagtípus	Krit. fesz.intenzitási tényező K_C (MPa·m ^{1/2})
T30	4,17±0,05
T45	3,76±0,05
T60	3,92±0,02
N30	3,74±0,02
N45	3,49±0,06
N60	3,28±0,03
PA6	5,33±0,21

A bazaltszálalás kompozitok kritikus feszültségintenzitási tényezője között nincs lényeges különbség (a legnagyobb eltérés mindössze 21%), illetve enyhén csökkenő tendencia figyelhető meg. A mosott szálak alkalmazása itt is a tulajdonságok javulását eredményezte. A mosott bazaltszál előnye a nem mosotthoz képest annak tulajdonítható, hogy a nem mosott szálban nagyobb mennyiségben előforduló, a szálvégekről letört szálfejek repedések kiindulópontjaként szolgálnak.

Összefoglalás

A vizsgált anyagok közül a 60% bazaltszálalás kompozitnál számos probléma merült fel a felületi minőséggel kapcsolatban a nagy száltartalom következtében. A próbatetek felülete gyakran egyenetlen, érdes volt és fehér vagy szürke színű, a fa erezetére emlékeztető fátyolosság volt megfigyelhető. Emellett a 60%-os anyag – noha szilárdsági értékei igen jók – meglehetősen rideg és törékeny, ami a szakadási nyúlásban és a maximális (törési) lehajlásban (4. táblázat) is megmutatkozik. A 60%-os bazaltszál-erősítésű kompozit – noha kedvező tulajdonságokkal rendelkezik – túltelített, gyakorlati felhasználásra alapvetően alkalmatlan.

A bazaltszál-tartalom növelése mind a hajlító-, mind a húzószilárdságot megnövelte. A mosott bazaltszál alkalmazása valamennyi mechani-

kai tulajdonság szempontjából jelentős előnyökkel jár. A húzó és hajlítási rugalmassági modulus megközelítőleg lineárisan növekszik a száltartalommal. A szakítóvizsgálatokból kapott eredmények (húzószilárdság, rugalmassági modulus és szakadási nyúlás) és a hajlítómódus száltartalomtól való függése megfelel az általános tapasztalatoknak. A 45%-os kompozit fajlagos ütőmunkája jelentősen meghaladja a 30%-osét, ugyanakkor a 45 és a 60%-os között nincs jelentős különbség. A SEN-T vizsgálattal megállapított kritikus feszültségintenzitási tényező tekintetében csak kis különbség állapítható meg a bazaltszálalás kompozitok között, de a tisztított bazaltszál alkalmazásának előnye itt is jól látható. Az optimális száltartalom valahol a 30 és a 60% között lehet: a 30%-os mechanikai tulajdonságai viszonylag szerények voltak, míg a 60%-os rendszer túltelített, a belőle készült termékek felületi minősége elfogadhatatlanul rossz. Összességében megállapítható, hogy ha a 60%-os bazaltszálalás kompozitot elhagyjuk az összehasonlításból, a mechanikai tulajdonságok tekintetében a T45 a legjobb.

Hivatkozások

- [1] K. Pölöskei, Sz. Matkó, T. Czigány, Gy. Marosi: Szál–mátrix határ-felületi adhézió vizsgálata bazaltszál-erősítésű polipropilén kompozit rendszerekben, *Műanyag és Gumi*, 2003, 5, p. 145-149.
- [2] T. Czikovszky, P. Nagy, J. Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
- [3] D. M. Bigg, D. F. Hiscock: High performance thermoplastic matrix composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1988, 1, p. 146-160.
- [4] J. Militky, V. Kovacic: Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments, *Textile Res. J.*, 1996, 4, p. 225-229.
- [5] W. B. Goldsworthy: New basalt fibre increases composite potential, *Composites Technology*, 2000, **July-August** p. 15-16.
- [6] www.basaltfibre.com/eng
- [7] T. Czigány, Gy. Marosi: Bazaltszál-erősítésű polimer kompozit szerkezeti anyag kifejlesztése, *Műanyag és Gumi*, 2003, 5, p. 139-144.
- [8] J. L. Thomason, M. A. Vluc: Influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene 1, *Composites Part A*, 1996, **27A** p. 477-484.
- [9] D. McNally: Short fiber orientation and its effects on the properties of thermoplastic composite materials, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 1977, **8(2)** p. 101-154.
- [10] J. L. Thomason: Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fibre-reinforced polypropylene 5, *Composites Part A*, 2002, **33**, p. 1641-1652.
- [11] T. Czigány, J. Marosfalvi: Poliamid 6 törésmechanikai vizsgálata a hőmérséklet és az igénybevételi sebesség függvényében, *Műanyag és Gumi*, 1998, 9, p. 284-288.

Műanyagokhoz



feldolgozógépek,



vizsgálógépek és -eszközök
széles választékát kínálja

TESTOR

Budapest I., Aladár u.19.
www.atestor.hu