

Hosszú szálakkal erősített hőre lágyuló műanyag kompozitok (LFT)

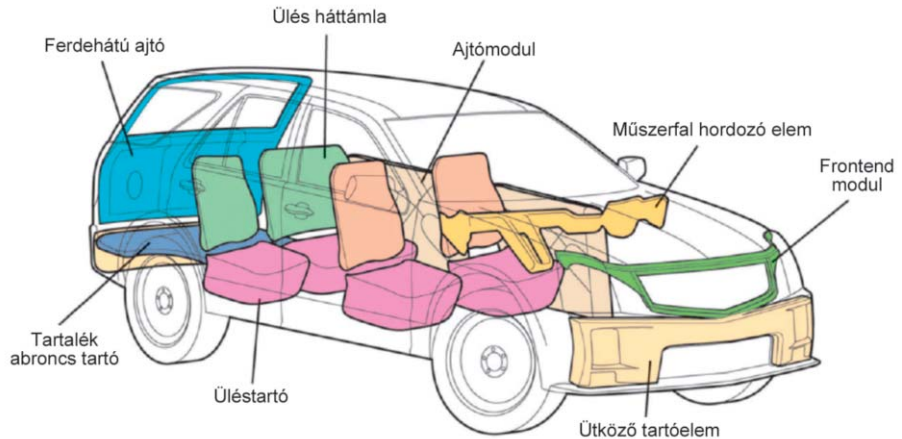
A szálerősítéssel a hőre lágyuló műanyagok modulusa, szakítószilárdsága és ütésállósága jelentősen növelhető. A növekedés mértéke az átlagos szálhossz függvénye. Az LFT technológiák fejlesztése során arra törekszenek, hogy minél nagyobb maradjon az átlagos szálhossz még a fröccsöntéssel történő feldolgozás után is. A technológia nem új, de folyamatos fejlesztés alatt áll, ennek egyes aspektusait tekintjük át, különöse tekintettel a feldolgozásra és a szálorientáció eloszlásra.

Tárgyszavak: szálerősítés, szálhossz eloszlás, orientáció, fröccsöntés, préselés, hibrid kompozitok, reciklálás

Mi az LFT technológia megkülönböztető jegye és mik az előnyei?

Jól ismert tény, hogy ahhoz, hogy a hőre lágyuló mátrixban eloszlott erősítőszálak valóban hatékonyak legyenek (különösen a szilárdság vonatkozásában), ahhoz az átlagos szálhossznak meg kell haladnia egy kritikus értéket (azon túl, hogy a szál/mátrix adhézióknak is jónak kell lennie). A legnagyobb hatást akkor érhetjük el, ha párhuzamos folyamatos erősítőszálakat használunk, de ez egyrészt nagyon erős anizotrópiát okoz a szálirányban és arra merőlegesen, másrészt nehéz az impregnálás és erősen korlátozott a feldolgozás módja. A másik véglet az örölt szálak alkalmazása, ahol a töltőanyagokhoz hasonlóan hőre lágyuló mátrixból kompaundálás útján granulátumokat készítünk, majd ezeket dolgozzuk fel fröccsöntéssel. Ennél a módszernél mind a kompaundálás, mind a feldolgozás során az ömledékviszkózitás és a szálak kölcsönhatása miatt folyamatosan csökken az átlagos szálhossz, az erősítőszálak egyre nagyobb hányada kerül a kritikus szálhossz alá, vagyis válik egyszerű töltőanyaggá erősítőszál helyett. A két szélsőség között helyezkednek el az olyan módszerek, ahol egy erősítőszál rovingot (üveg) vagy tow-t (szénszál) (mindkettő folyamatos szál-pápszalma, csak a két ipar eltérő elnevezést használ) impregnálunk folyamatosan, majd az impregnált extrudátumot cm nagyságrendű granulátumokra vágjuk, és azt tesszük a fröccsöntő gépbe. A feldolgozási körülmények kicsit eltérnek a rövidszállal erősített hőre lágyuló műanyagokétól, a szálorientáció is kevésbé lesz egyenletes, de az átlagos szálhossz megnő, ami a mechanikai jellemzők jelentős javulását eredményezi. Az LFT technológiával gyártott granulátumok mindenképp az autóiparban terjedtek el (a felhasználás mintegy 80%-a), de a villamos ipar is jelentős felhasználó. A 2000-es években 10%-ot meghaladó ütemben nőtt a piac, de még utána is maradt a 10% körüli éves növekedés. Az LFT mátrixok között jelentős szerepet játszanak olyan tömegpolimerek mint a PP (amely ezzel a „javítással” a műszaki műanyag kategóriába emelkedik), vagy a polietilén, de a főszereplők a műszaki műanyagok, különösen a poliamidok (PA6, PA66 stb.), a politejsav (PLA), különböző telített hőre lágyuló poliészterek, mint amilyen a polietilén-tereftalát (PET), a polibutilén-tereftalát (PBT), a poliformaldehid (POM), akrilátok (PMMA), de az olyan nagyteljesítményű műszaki műanyagok is, mint a polifenilén-szulfid (PPS) vagy a poliaril-éter-ketonok (PEEK, PEKK, PEKEKK stb.). Az LFT piacon belül a PP képviseli a 65%-ot, a poliamidok 20%-ot és a maradék 15% jut az összes többi mátrixanyagra. Természetesen az egykomponensű mátrixok mellett számos esetben keverék mátrixot (blendeket) is használnak (pl. PP + PA – bár itt esetenként a kompatibilitási problémákat is meg kell oldani). Az erősítőszálak között (elsősorban ára miatt) az üvegszál (GF) dominál, de vannak szénszállal,

bazaltszállal vagy aramidzállal erősített típusok is. Az utóbbi időben a természetes erősítőszálak használata is terjed, erre még visszatérünk. Az erősítőszálak esetében ugyancsak lehet kombinálni a különböző anyagokat (pl. üveg + szénszál). A szénszál hozzáadására pl. a villamos vezetőképesség növelése miatt is szükség lehet. A vizsgálatok szerint az ún. perkolációs küszöb (ahol a vezetőképesség gyors ütemben kezd nőni) 6–10 tf% szénszál hozzáadásával érhető el. A szénszál hányadának növelésével a modulus nő, de a szilárdság gyakran csökken. Ennek egyik oka, hogy a szénszálak esetében nehezebb olyan jó szál/mátrix tapadást elérni, mint az üvegszálak esetében. Szintetikus és természetes szálak kombinált hozzáadása esetén a szintetikus szálak „hozzák” a jobb mechanikai eredményeket, a természetes szálak pedig növelik a megújuló forrásból származó alapanyagok hányadát. Az üvegszálak és természetes



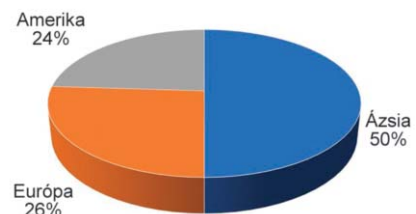
1. ábra. Néhány, tipikusan LFT felhasználással készülő szerkezeti elem.

szálak kombinációjakor az üvegszálak jelentősen javítják a mechanikai szilárdságot és különösen az ütésállóságot, a természetes szálak a küllemet és a megújuló anyaghányadot.

A legnagyobb felhasználó az autóipar, néhány tipikus alkalmazást mutat be az 1. ábra.

További felhasználások találhatók egyéb közlekedési eszközökben, orvosi eszközökben, katonai alkalmazásokban, hajókban, sporteszközökben és máshol. Különösen fontosak az ilyen anyagok az erős korrózióknak vagy magas hőmérsékletnek kitett alkalmazásokban.

Az AMI cég 2021-ben adott közre egy piaci tanulmányt, amelyben az LFT-PP típusok felhasználását vizsgálta alkalmazások, termelők és földrajzi eloszlás szerint. A felhasználásnál az autónként felhasznált LFT mennyiségét vizsgálja kg-ban, hogy le lehessen választani a gépkocsigyártás fluktuációját az LFT felhasználás előrehaladásáról. Ami a területi eloszlást illeti, Ázsia vezet (2. ábra).



2. ábra. Az LFT-PP típusok felhasználásra régió szerint.

Az LFT felhasználás különösen gyorsan nőtt **Fiat-Chrysler** csoportban, amely a **PSA**-val való egyesülés óta a **Stellantis** része lett. Az egyik leggyorsabban növekvő alkalmazás a felemelhető hátsó ajtó elemek gyártása gépkocsikon, ahol már teljesen fémmentes megoldások is léteznek. Ezekben az LFT a teherhordó elem, amelyet nemesített PP-vel kombinálnak a festhetőség érdekében. Különösen fontos ez a megoldás az elektromos meghajtású autókban. Egyes LFT-PP belső elemek felületminősége olyan jó, hogy nem is szükséges burkolatot vagy bevonatot alkalmazni rajtuk. Egyes villamos meghajtású kocsikban a felszabaduló hely lehetőséget kínál első csomagtartó elemek elhelyezésére is, de ezeknek ütközésállóknak kell lenniük.

A **Polyplastics Group** tavaly piacra dobott hosszú cellulóz szállal erősített PP alapú LFT-t (*Plastron LFT*) autóipari alkalmazásra (ajtó modulok, konzolok, karfa betétek), ami környezetvédelmi szempontból kedvezőbb, és körülbelül ugyanolyan mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint az üvegszálak változat. A cellulóz előnye, hogy nem használ fel ehető bioanyagot, ezért negatív a széndioxid felhasználása és megújuló nyersanyagként számít. A gyártásához felhasznált regenerált cellulózt olyan oldószeres módszerrel nyerik ki, amely alig termel hulladékot. A Polyplastics által használt oldószeres módszer kevesebb széndioxid kibocsátással jár, mint az üvegszál gyártás. A termék sűrűsége 10%-kal kisebb,

mint az üvegszálás LFT-é, ezért térfogatra számítva még kedvezőbb az összehasonlítás. A regenerált cellulóz előállítására használt szokásos oldószeres módszer, amelyben feloldják a cellulózt, majd fonják és helyreállítják az eredeti cellulózt, jelentős üvegház hatású gáz kibocsátásával jár, a **Polyplastics** szabadalmazott módszere viszont szinte a teljes oldószer mennyiséget visszanyeri, ezért környezetvédelmi szempontból sokkal kedvezőbb.

A szilárdságnövekedés magyarázata

A magyarázatot a szilárdságnövekedésre az (amúgy csak közelítően érvényes) Kelly-Tyson összefüggés adja, amelyből kiszámolható a kritikus szálhossz (pontosabban az ún. nyúlánkság, vagy hossz/átmérő arány):

$$\left(\frac{l}{d}\right)_c = \frac{\sigma_{fu}}{2\tau}$$

ahol l a szál hossza, d az átmérője, σ_{fu} a szál szakítószilárdsága, τ pedig a szál/mátrix határfelületi nyírószilárdság. Az elvet a 3. ábra szemlélteti.

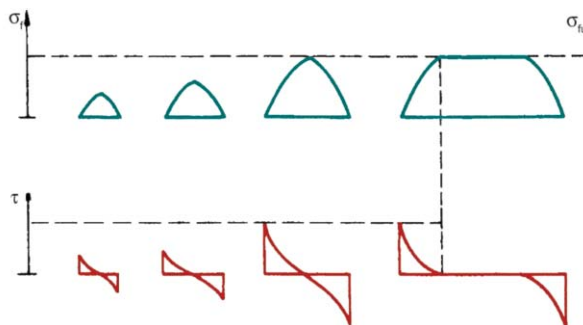
Nyilvánvaló, hogy a szálak a kritikus szálhossz felett képesek a legnagyobb mértékben átvenni a mechanikai terhelést a mátrixtól. Ha a kritikus szálhossz alatt vagyunk, tönkremenetel esetén a száلكihúzóadás valószínű, felette inkább szálszakadás, ami jóval több energiát emészt fel, ezért lesz pl. sokkal nagyobb az ütészállóság. A kritikus szálhossz természetesen függ a szál és a mátrixanyag anyagától, valamint a felületkezelés módjától. Üvegszál/PP kompozitok esetében az l_c érték 3–4 mm, üvegszál/PA66 esetében csak kb. 1,2 mm, ami kb. 200, illetve 80 l/d aránynak felel meg. A növekvő szálhossz azonban az egyre nagyobb viszkózitás miatt egyre nehezebb feldolgozhatóságot is jelent (4. ábra).

Mivel a hosszú szálak hajlamosak erősebben orientálódni az ömledékben a feldolgozás során, a legtöbb erőfeszítést a szálhossz és szálorientáció mérésére és előrejelzésére fordították, és vizsgálták az eredmények és a mérhető tulajdonságok közti összefüggéseket.

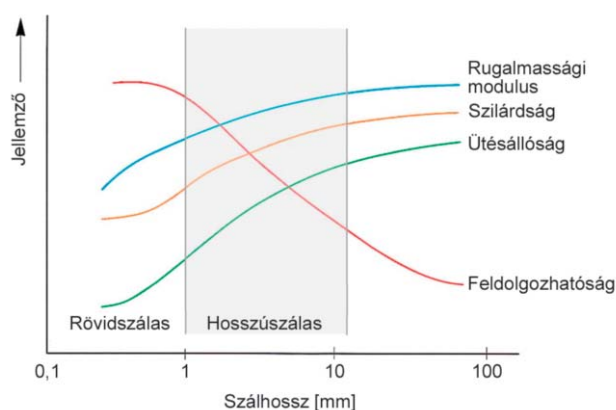
A feldolgozási módszerek fejlesztése

Mivel a hőre lágyuló műanyag ömledékek viszkózitása jóval nagyobb a (még ki nem keményített) hőre keményedő anyagokénál, nehezebb impregnálni a szálakat, valamint megfelelően kitölteni a szerszámokat. Ezért a szálakat előimpregnálják és az így keletkezett granulátumokat (pellet) fröccsöntik vagy préselik. A szálimpregnálás történhet keresztfejes extrúzióval, pultrúzióval és számos egyéb, szabadalmazott módszerrel. Az 5. ábrán látható az impregnálás sematikus folyamatábrája.

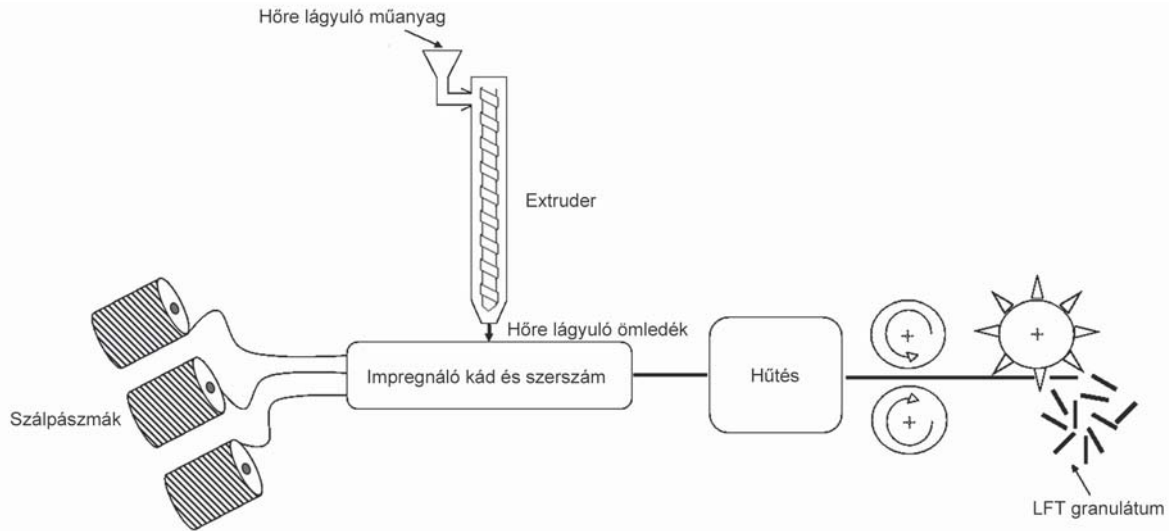
Ritkábban használt módszerek a por-impregnálás (amelyek konszolidáció követ), *in-situ* polimerizáció stb. Történt próbálkozás arra is, hogy száraz vágott szálakat egycsigás extruderben közvetlenül keverjenek össze műanyag granulátummal. Ha ez sikeres, nagyobb lesz a szálhossz mint kétszigás kompaundálás esetében, de többnyire az egycsigás kompaundálás hatékonysága kisebb.



3. ábra. A szálban ébredő nyújtási feszültség (felül) és a határfelületi nyírófeszültség (alul) a kritikus szálhossz alatti és feletti tartományban.



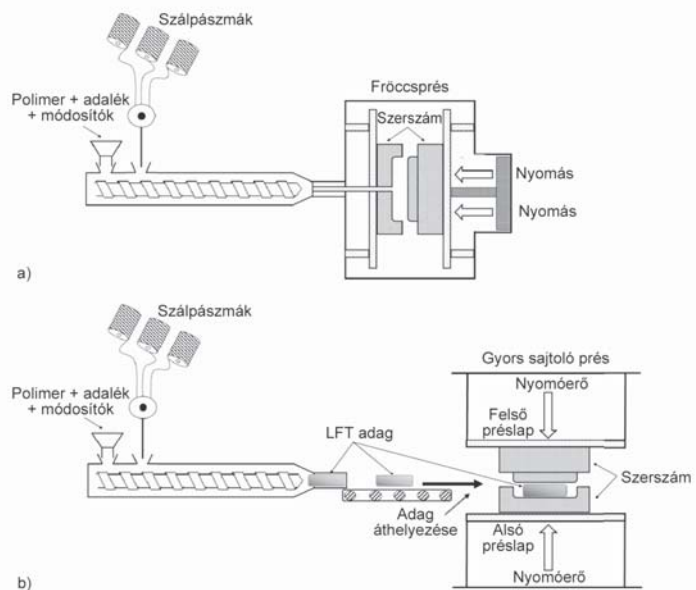
4. ábra. A (logaritmusos léptékben) ábrázolt szálhossz hatásának sematikus bemutatása a különböző mechanikai jellemzőkre és a feldolgozhatóságra.



5. ábra. Az LFT granulátumok előállításának általános sémája.

Ami az LFT granulátumok végtermékké történő feldolgozását illeti, itt a fröccsöntés és a préselés (sajtolás) az általánosan felhasznált módszerek. A fröccsöntés esetében azonban többnyire extruderrel kell elő-plasztikálni az ömledéket, és még így is rendkívül nagy fröccsnyomásra van szükség. Erősen orientált szálakat tartalmazó termékek képződnek, ami a szálirányban igen jó mechanikai jellemzőket biztosít, de a rendkívül nagy szál-szál súrlódás miatt a szálhossz 70–90%-kal csökken a fröccsöntés folyamán (nagyságrendileg 10 mm-ről 1 mm-re). Minél nagyobb a száltartalom, annál erősebb a töredezés. A száltöredezés valamelyest csökkenthető, ha kisebb nyíróerőt alkalmazunk a plastifikálás, a töltés és az utótöltés során. Nyilvánvaló, hogy a lassúbb szerszámfelöltés kisebb nyírást, de hosszabb ciklusidőt eredményez. A plastifikáló csiga geometriájával is csökkenthető a száltöredezés (kisebb kompressziós hányad, hosszabb olvasztási zóna, mélyebb ömledékcsatornák), és értelemszerűen a nagyobb beömlőnyílás is segít a szálhossz megőrzésében. Az ömledék hőmérséklet növelése (ha nem okoz degradációt) csökkenti a viszkozitást és egyenletesebb száelosztást eredményez. Az erősítőszálak írzésének módja és mértéke is befolyásolja a töredezést, valamint a szál-mátrix adhéziót. A kiindulási szálhossz növelése viszont nem mindig eredményez javulást a végtermék tulajdonságaiban. Sőt, egy vizsgálatban azt figyelték meg, hogy a 10 mm-s szálhossz 25 mm-re növelése erősebb szerkezeti inhomogenitást, szál-agglomerációt és helyi porozitást eredményezett.

Ha préseléssel dolgozzuk fel az LFT granulátumokat, akkor kis nyíróhatású extruderrel hozzuk létre az ömledéket, amelyet a szerszamba öntünk, majd végső formába hozzuk. Arra is történtek próbálkozások, hogy az extrúziós lépést kihagyva közvetlenül a granulátumot préseljék, de ott nehezebb elérni a porusmentes szerszámkitöltést. Az extrúzióval kombinált préselés legnagyobb előnye a szálhossz megőrzése és ebből adódó tulajdonságjavulás – ezért az autóipar különösen érdeklődik a módszer iránt.



6. ábra. Két direkt-LFT módszer vázlata: a) közvetlen impregnálás fröccsöntéssel kombinálva, b) közvetlen impregnálás préseléssel kombinálva.

Ilyen körülmények között a kiindulási 25 mm-s szálhossz akár 10 mm-s is maradhat. A préselés során is kialakulhat kedvező szálorientáció, de azért ez nem olyan mértékű, mint a fröccsöntés során.

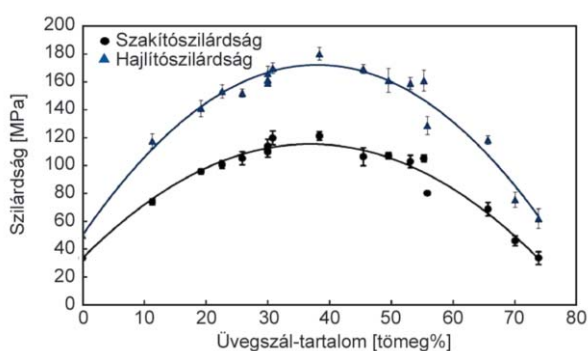
A szállítási és gyártási költségek csökkentése érdekében már az 1990-es években megkezdtek az ún. direkt LFT (D-LFT) módszerek fejlesztését (6. ábra), ahol az in-line impregnálást közvetlenül követi a fröccsöntési vagy préselési szakasz. Ezzel a csomagolás, szállítás kiküszöbölhető és alacsonyabb hőmérsékleten történik a feldolgozás is (nem kell kétszer felmelegíteni az ömledéket). Ez csökkenti mind a polimer, mind a szálak degradációját. Érthető módon a D-LFT készülékek 90%-át az autóipar alkalmazza. Az így létrehozott nyersanyag költsége akár fele is lehet annak, mint ha LFT granulátumot kellene vásárolni. Természetesen a beruházási költségek is nagyobbak, de már évi 30 000–50 000 termék gyártása esetén megtérül a beruházás. A feljebb említett módszereknél ritkább, de használt a fröccs-sajtolás és az extrúziós fűvás is LFT feldolgozásra.

A szálmennyiség, szálhossz és orientáció hatása a terméktulajdonságokra

Az elérhető száltartalom nemigen haladhatja meg az 50 tf%-ot, ami kb. 70 tömeg%-nak felel meg. A modulus általában az egész tartományban kb. lineárisan nő a száltartalommal, de a szilárdság maximuma 40–50 tömeg% körül jelentkezik (ami 20–30 tf%-nak felel meg, 7. ábra).

A legnagyobb száltartalom esetében a szilárdság már a tiszta PP értéke alá esett. Ez a nem jól diszpergált szálkötegeknek tudható be. A szálhossz-eloszlást többnyire mikroszkóppal vizsgálják a mátrixanyag hőbontása után (bár ez a módszer inkább a rövidszálas rendszerekben vált be). Az üveg/PP és üveg/PA rendszereket összehasonlítva a PA alapú rendszerekben azt figyelték meg,

hogy az átlagos szálhossz a száltartalommal fordított arányban változik, és kisebb, mint a PP alapú rendszerekben. Az LFT rendszerekben a szálhossz eloszlás elnyúlt, nem szimmetrikus, és sokkal szélesebb, mint a rövidszálas rendszerekben. Pontosabb eredményeket kapunk, ha röntgen mikrotomográfiát használunk, de ez természetesen jóval drágább. Ugyanez a módszer használható az orientáció-eloszlás vizsgálatára is. Vannak ennél olcsóbb, de szintén nem egyszerű módszerek is, pl. lecsiszolják a kompozit felületét és egy vékony rétegben eltávolítják a mátrixot anélkül, hogy a kilógó szálakat eltávolítanák. Így már mikroszkópos képfeldolgozással megbecsülhető a kilógó szálak orientációja. Így a 2D vizsgálatok 3D eredményekké alakíthatók. A mikro-CT közvetlenül 3D eredményeket szolgáltat. Ahhoz azonban, hogy a szálakat jól meg lehessen különböztetni a mátrixtól nagyfelbontású CT készülékekre van szükség (egy 15 µm átmérőjű szál biztos felismeréséhez mintegy 4 µm felbontásra van szükség), és a jó kontraszthoz jelentős sűrűségeltérésre van szükség a szál és a mátrix között, ami az üvegszálak esetében jobban teljesül, mint a szénszálaknál. Az orientáció-eloszlás feltérképezésével jól megkülönböztethetők a fröccsöntött LFT termékek felületi és mélységi rétegei (az ún. mag-héj szerkezet) és az átmeneti réteg. A felületi réteg és a magréteg is erősen orientált szálakat tartalmaz, de az orientáció iránya eltérő, az átmeneti rétegben kisebb az orientáció mértéke. Az orientációt minden esetben az ömledék folyása okozza, amely „irányba állítja” a szálakat. Ennek az orientációnak az elméleti előrejelzése (feldolgozási) szimulációja folyamatosan fejlődik, de a magrétegen belüli orientáció előrejelzése mérsékelt sikeres. A szálhossz eloszlást a rövidszálas kompozitok esetében elhanyagolják, de ez az LFT kompozitok esetében nem lehetséges. Vannak arra vonatkozó módszerek is, amelyek a szálakra ható erők számításával megpróbálják előre jelezni a száltöréseket, így a szálhossz-eloszlás változását is. Ezek a módszerek, legalábbis tendenciájukban helyes eredményeket szolgáltatnak. Minden ilyen modellezés célja az, hogy



7. ábra. A szakító és hajlítószilárdság változása a száltartalommal üvegszálás polipropilén (PP/GF) kompozitokban.

előre jelezzük a mechanikai tulajdonságok változását a feldolgozás során vagy a fröccsöntött darab különböző területein. A modellek részben mikromechanikai, részben reprezentatív térfogati modellekre oszthatók. Általánosságban elmondható, hogy a modellek pontossága folyamatosan nő és jól használhatók a gyakorlati előrejelzésben is. Természetesen a nagy száltartalom esetében, ahol a szálak egymással való kölcsönhatása egyre jelentősebb, a modellek egyre pontatlanabban használhatók. Azt is hangsúlyozni kell, hogy a modellezés nagy része a fröccsöntéssel feldolgozott LFT kompozitokra vonatkozik, a préselt mintákra, ahol hosszabbak maradnak a szálak, még fokozni kell az erőfeszítéseket.

Az 1. táblázat néhány reprezentatív adatot mutat be különböző LFT kompozitok mechanikai jellemzőiről.

1. táblázat. Néhány LFT rendszer tipikus mechanikai jellemzői.

LFT kompozit	Száltartalom [%]	Szakítószilárdság [MPa]	Húzómodulus [MPa]	Hajlító szilárdság [MPa]	Hajlítómodulus [MPa]
Üveg/PP	30–40	48–150	6.5–10.8	167–175	7.8–9.0
Üveg/PA	25–50	106–251	7.7–18	173–324	6.5–15.9
Üveg/PMMA	10–30	90–113	–	120–182	4.8–8.2
Üveg/PBT/PC	10–40	70–137	–	86–211	4.1–11.1
Üveg/ABS	30	78	–	–	–
Üveg/PET	30	126	–	–	–
Szénszál/PA	18–35	110–172	6.5–14.70	222–242	14.1–16.6
Szénszál/PP	18–50	47–105	6.7–28.8	95–179	5.1–18.4
Bazalt/PA	30	136	7.2	158	4.8
PET szál/PP	30	15–29	2.1–2.3	–	–
PET szál/PET	30	52	3.3	–	–

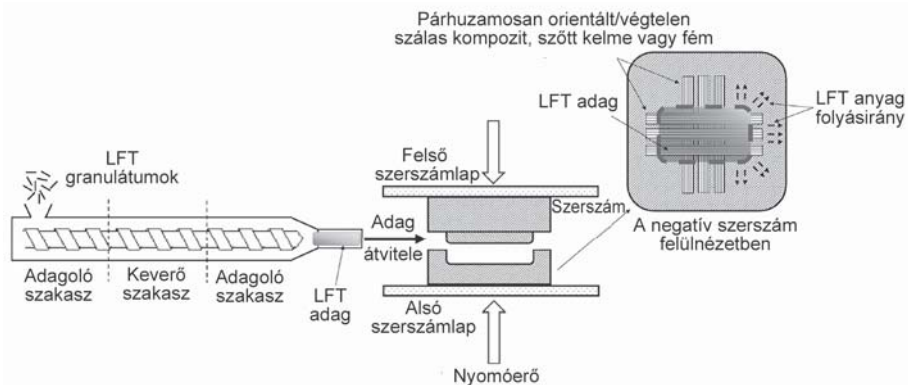
Szokták összevetni az LFT kompozitok jellemzőit az ún. GMT kompozitokéval. A GMT kompozitok síkban izotróp módon elosztatott (tipikusan 5–6 cm hosszú) vágott szálakból és hőre lágyuló polimerekből készülnek préseléssel, majd esetenként termoformázással. Általánosságban azt lehet mondani, hogy az LFT anyagokat olyan helyeken használják, ahol a modulus és a szilárdság a legfontosabb, a GMT anyagokat pedig ott, ahol az ütésállóság és fáradásállóság a döntő. Ehhez hozzá kell tenni azt is, hogy a két anyagcsoport feldolgozás és termék szempontjából nem csereszabatos, a GMT-ből inkább csak héjszerkezetek hozhatók létre, míg az LFT-ből sokkal változatosabb alakok (akár változó falvastagsággal is). A piaci tendenciák mindenesetre az LFT folyamatos térnyerését mutatják a GMT kárára, az LFT piacon belül pedig a D-LFT módszerek terjedése látható.

Az LFT anyagok a hőre lágyuló mátrix miatt eleve jó ütésállóságot mutatnak, amely még tovább javítható adalékok (kompatibilizátorok) segítségével. Ez különösen a szénszállal erősített rendszereknél fontos, ahol az üvegszálnál megszokott kémiai kapcsolat nem alkalmazható. A szemcsés töltőanyagok hozzáadása viszont inkább csökkenti az ütésállóságot. Az üveg/PP és üveg/PA rendszerekben nem sikerült rideg/rugalmas átmenetet kimutatni a nagy sebességű törésmechanikai tesztekben, csak a különböző tönkremeneteli módok (szálszakadás, mátrixrepedés és száلكihúzóadás) aránya változott. Általánosságban elmondható, hogy a szálak hozzáadása csökkenti a kúszási hajlamot, de ahol (pl. az üveg/PA66 rendszer esetében) a kültéri öregedés hatására a láncok tördelődnek és nő a kristályosság, ott a kúszási hajlam nőhet is. A reológiai vizsgálatokból a derült ki, hogy az LFT rendszerek viszkozitása csökken a nyírósebességgel – annál jobban, minél nagyobb a száltartalom. Ez a szálak párhuzamos orientációjával magyarázható.

Hibridizáció és kötések kialakítása

Hibrid kompozitok alatt olyan rendszereket értünk, ahol többféle mátrixanyagot és/vagy erősítőanyagot használunk. Az erősítőanyagok esetében kombinálhatjuk a különböző erősítőszálakat (pl. üveg és szénszál), vagy a szálak geometriáját (pl. folyamatos üvegszál vagy vágott üvegszál „keverése” LFT

üvegszállal). A végtelen üvegszál laminátumok pl. préseléssel kombinálhatók az LFT-vel, ami a szálirányban jelentősen növeli a hajlítószilárdságot. Ilyen esetekben szinte mindig új határfelületek képződnek, ezért a feldolgozási paramétereket optimalizálni kell, hogy a legnagyobb határfelületi szilárdságot kapjuk. A végtelen szál kombináció esetében próbáltak előimpregnált szőtt kelmével erősített hőre lágyuló lemez és LFT kombinációjával (8. ábra).



8. ábra. Példa a hibridizációra: szőtt, előimpregnált elem kombinációja LFT-vel a préselési technológia alkalmazásával.

Ezek a kombinációk különösen az autóiparban terjedtek el (pl. ütköző tartóelemek gyártásánál, ahol fontos a szilárdság és az ütésállóság). Ilyen megoldással az acélszerkezethez képest 35%-os súlycsökkentést sikerül elérni. A megfelelően választott hibridizálási technológia a gyártási sebességet sem csökkenti le lényegesen. A hibridizáció a kompozitok azon jellemvonását is kidomborítja, hogy a folytonos szál erősítést elég a kritikus területeken beépíteni. A folytonos szálerősítésű elemekkel való kombináció mellett elterjedt a fémek és az LFT kombinációja is, ahol a határfelületi kötést a felület durvításával (mechanikai egymásba hurkolódás) érik el. Autóiparról lévén szó a könnyűfémekkel (alumínium-ötvözetekkel) való kombináció különösen kedvező. Az alakos fémekkel való hibridizáció mellett a fémszálak vagy fémhálók hibridizációját is alkalmazzák LFT-vel mind a fröccsöntési, mind a préselési technológia felhasználásával. Az LFT dekorfóliákkal történő hibridizációja a külső felületek minőségének javítását célozza („A” osztályú felület). Az LFT kompozit egyirányban erősített (azonos mátrixú) kompozit elemmel hegesztés útján is egyesíthető, bár itt célszerű határfelületi erősítőelemek (pl. üvegfátyol, fémháló stb.) alkalmazása, amelybe a megolvadó hőre lágyuló műanyag mindkét oldalról behatolhat, mechanikailag rögzítve a határfelületet. Természetesen ilyenkor a feldolgozási paramétereket is nagyon gondosan rögzíteni kell. LFT és fém kötések ultrahangos szegecslést is szívesen alkalmaznak.

Az LFT anyagok adalékai

Az LFT anyagokhoz számos adalékot adnak különböző tulajdonságok (pl. árcsökkentés, modulusnövelés, felületi minőségjavítás, égésgátlás, színezés) elérése céljából. Az ásványi töltőanyagokkal ugyan csökkenthető az ár, de általában csökken az ütésállóság és a szállhossz is a súrlódás miatt. Különböző halogéntartalmú és halogénmentes égésgátlók hozzáadásával az LFT anyagok viszonylag könnyen elérhetik a V0 minősítést anélkül, hogy komoly áldozatokat kellene hozni a mechanikai jellemzőkben.

Újrafeldolgozhatóság

Az LFT anyagok mindkét komponense újrahasznosítható – ha nem is mindig az eredeti minőségben. A jelenlegi szabályozás szerint a gépkocsikat 95%-ban újrahasznosítható anyagokból kell gyártani, amelyből 85% mechanikai reciklálást és 10% energetikai hasznosítást írnak elő. Az LFT anyagokat például darabolás után szendvicsszerkezetekben lehet felhasználni maganyagként. Az LFT feldolgozási maradékok visszadolgozása a friss LFT-be ugyancsak járható út, csökkentve a gyártási hulladékot. Ennek határt szab a friss és a hulladék LFT szállhossz-eloszlásának eltérése. A nagyobb hőre keményedő kompozitszerkezetekből (pl. repülőgép alkatrészek, szélturbina lapátok) visszanyert szénszálak (és kisebb mértékig üvegszálak), amelyek a mátrixanyag pirolízisével állíthatók elő, ugyancsak felhasználhatók

LFT gyártáshoz, bár pl. az üvegszálak esetében felületkezelésre van szükség a megfelelő adhézió eléréséhez. Az üveg/PP LFT esetében a felületkezelés megoldható maleinsavanhidriddel ojtott PP (PP-g-MA) alkalmazásával, de az aminoprolil-szilános kezelés még hatékonyabbnak bizonyult.

Összeállította: dr. Bánhegyi György

Ning H., Lu N., Hassen A. A., Chawla K., Selim M., Pillay S.: A review of long fibre-reinforced thermoplastic or long fibre thermoplastic (LFT) composites = International Materials Reviews, 2019, p. 1743-2804

Sherman L. M.: Cellulose Fiber Reinforced PP Targets Automotive = Plastics Technology Online, 2023. március, <https://www.ptonline.com/news/polyplastics-plastron-lft-cellulose-fiber-reinforced-pp-targeted-at-automotive-applications->

Sherman L.M.: EV Liftgates to Boost Demand for LFT PP = Plastics Technology Online, 2021. október, <https://www.ptonline.com/news/ev-liftgates-to-boost-demand-for-lft-pp->