

## Erősítőszálak választéka és tulajdonságai

Néhány éve a szálerősítés szinte kizárólag az üvegszálak bevitelét jelentette a műanyagmátrixba. Napjainkban azonban a felhasználható szálak választéka jelentősen kibővült egyfelől a természetes eredetű szálak, másfelől a nagy szilárdságú szénszálak irányába. A világ szálerősítésű műanyagpiacát 7 millió tonnára becsülik, amelynek növekedését az erősítőszálak választékának bővülése mellett a technológiák fejlődése és az alkalmazások bővítésére irányuló fejlesztőmunka is garantálja.

*Tárgyszavak: szálerősítés; üvegszál; szénszál; természetes szálak; textilszerkezet; kompozit; felületkezelés; epoxigyanta; piaci adatok.*

### Az erősítőszálak szerkezete és tulajdonságai


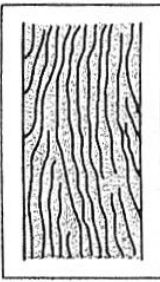
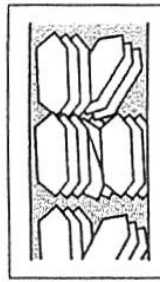
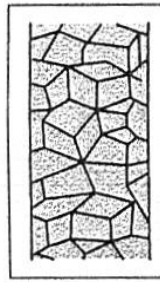
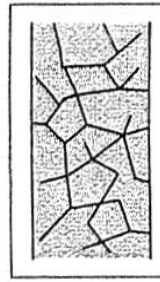
A szálakkal erősített összetett anyagok (kompozitok) megkerülhetetlenek az új műanyag szerkezeti elemek és alkatrészek fejlesztésében jó mechanikai tulajdonságaiknak és kis sűrűségüknek köszönhetően, még akkor is, ha feldolgozásuk ma még nem is problémamentes minden esetben. Az *Airbus* típusú repülőgépekben már a hetvenes évektől kezdve alkalmaztak *szénszállal erősített kompozitokat*, és azóta *arányuk 20% fölé emelkedett a beépített szerkezeti anyagok között.*

A szálerősítésű műanyag szerkezetekben a szálak felelősek a mechanikai tulajdonságokért, míg a mátrixanyag szabja meg az alkalmazható feldolgozási eljárást, a forma kialakításának szabadságát és a kompozit hőállóságát, felületi minőségét. A szálak anizotróp jellege alapján, esetleg különböző textilszerkezeteket használva, az igénybevételhez legjobban illő geometriai formákat lehet kialakítani. Ezenkívül nagy szerepet játszik a szálak kiemelkedő szívóssága a nagy igénybevételeknél és a szálak nagy energiaelnyelése az ütközéseknél.

A műanyagok erősítésére elméletileg minden szálás anyag felhasználható, bár természetesen nem mind kerül valóban alkalmazásra is. Az *1. ábrán* látható a különböző szálak szerkezete, beleértve a kristályosságot, az orientációt és a szerkezeten belüli kötés típusát.

A szálak szerkezete meghatározza a mechanikai tulajdonságokat. A textilszálként ismert poliamid- és poliészterszálak a hajlékony molekulák nagy nyúlása ellenére sem mutatnak kiemelkedő tulajdonságokat, mivel viszonylag kicsi a kristályosságuk és az orientációjuk. Ezzel szemben a merev aromás poliamidláncok orientálódása nagy, és a kristályosság is közel 100%, ezért az aramidyszálak mechanikai tulajdonságai jobbak. Ehhez hasonlóan a *szénszálnál is a szinte teljesen kristályos lemezes grafitszerkezet a kiemelkedő tulajdonságok hordozója.* Mindezek a szálak kifejezetten anizotrópok,

ugyanakkor az üveg- és a kerámiaszálak szerkezete nem irányfüggő. Jó mechanikai tulajdonságaikat a kerámiaszálak polikristályos szerkezetüknek, az amorf üvegszálak az erős SiO<sub>2</sub> kötéseknek köszönhetik. Ehrenstein a szálak paradoxonjának nevezi azt a jelenséget, hogy egy anyag szálként mindig nagyobb szilárdságot mutat, mint kompakt formában, és minél vékonyabb a szál, annál erősebb. A 2. ábrán az üvegszál húzószilárdságának a szálátmérőtől való függése látható.

Szál	PET/PA	Aramid	Szénszál	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC	Üvegszál
Szerkezet					
	1D szálak két fázis	1D szálak egy fázis	2D lemezes	3D izotróp	3D izotróp
Kötés	atomkötés v.d.Waals	atomkötés hidrogénkötés v.d.Waals	atomkötés v.d.Waals	atomkötés	atomkötés
Kristályosság	csekély	para: 100%	para: 100%	polikristályos	amorf
Orientáció	kicsi	nagyon nagy	nagy	nincs	nincs

1. ábra Az erősítőszálak szerkezete



2. ábra A üvegszál húzószilárdságának függése a szál átmérőjétől

### Üvegszálak: kedvező ár-érték arány

Az 5–13 μm átmérőjű üvegszálakat 1250 °C hőmérsékletű olvadékból állítják elő 3000 m/min húzási sebességgel. Az 1–2 mm átmérőjű lyukakból kilépő mintegy

40 ezerszeresre megnyújtott és megdermedt szálakat ún. rovinggá fogják össze. Egy ilyen roving több ezer elemi szál tartalmaz. A szálak vastagságát a  $k$  értékkel jellemzik ( $1k = 1000$  elemi szál). Az elemi szálak felületét speciális anyaggal kezelik annak érdekében, hogy a filamensek összetapadjanak és ezáltal jobban kezelhetők legyenek. A felvitt réteg egyben védi a vékony szálakat törés ellen a textilműveletek során, valamint javítja a tapadást a mátrix és az üvegszál között is. A különböző kémiai összetételű üvegszálak közül messze a legelterjedtebb az ún. E-üveg, amely alkálimentes alumínium-boroszilikát. Ezenkívül használják még a nagy szilárdságú R/S üveget, az emelt modulusú M-üvegszálat és a C-üvegszálat, amelyet jó kémiai tulajdonságok jellemznek. Az üvegszálak E-modulusa – az M-üveg kivételével - viszonylag alacsony, ezért a nagy merevséget igénylő alkalmazásokban, pl. primer repülőgépelemekhez nem jöhetnek szóba, de az autópárhuzban gyakran alkalmazzák őket.

### Szénszálak: kiemelkedő tulajdonságprofil

Szerkezetüket tekintve a szénszálak kétdimenziós kovalens kötéseikkel a lemezes felépítésű szerkezeti anyagok közé tartoznak. Nagyon nagy orientációjuk és 100%-ban parakristályos szerkezetük kiváló tulajdonságprofil eredményez. A szénszál elemi szerkezeti egysége a grafitlemez, ahogy ez az 1. ábrán látható. A szerkezet nagy fokú anizotrópiája a mechanikai tulajdonságokban jelentkezik.

A szénszálgártás két részfolyamatból áll. Az első lépésben 200–300 °C-on oxidálják a poliakrilnitril-szálat, majd a második lépésben 1300–1500 °C között nitrogén-áramban karbonizálják. Ebben a két lépésben nagy szilárdságú (HT), de csak közepes modulusú szálakat (IM) nyernek. Ahhoz hogy az E-modulust tovább növeljék (HM-szálak), 2500 °C feletti további grafitizálásra van szükség. A különböző szénszálak tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat

Különböző szénszáltípusok alapvető tulajdonságai

Tulajdonság Szál típus	Elemi szál/ roving arány, K	Átmérő $\mu\text{m}$	Sűrűség $\text{g/cm}^3$	Húzó- szilárdság MPa	E-modulus MPa	Szakadási nyúlás %
Nagy szilárdságú szálak (HT)	1–24	7	1,76–1,78	3500–6000	221–245	1,5–2,0
	48–600	7	1,76–1,8	3500–4000	225–240	1,5–1,6
Közepes szálak (IM)	6–24	5	1,8	4800–6370	276–300	1,8–2,2
Nagy modulusú szálak (HM)	1–24	7	1,8–1,93	2740–5490	300–680	0,7–1,9
Nagy szilárdságú és nagy modulusú szálak (UM)		5				

A táblázatban szereplő mechanikai értékek széles tartománya lehetővé teszi, hogy az adott alkalmazási területhez optimális szénszáltípust lehessen kiválasztani. Az egyes szénszáltípusoknál nem csak a mechanikai sajátságok, hanem számos más tulajdonság is különbözik, mint pl. a hővezető képesség, a hőtágulási együttható, az elektromos vezetőképesség és a tulajdonságok anizotrópiája.

## Polimerszálak: formatartás magas hőmérsékleten

Az *aramid* gyűjtőnevű *aromás poliamidok*, az aromás szerkezeti elemeket a fő láncukban tartalmazzák. Ez eredményezi a merev molekulakonfigurációt. A molekulaláncok térbeli okok miatt nem hajtogatódnak, ezért *a szálirányú kristályosodás majdnem 100%-os*. Ennek a szerkezetnek köszönhetőek a jó mechanikai tulajdonságok és a magas hőalaktartóság. Az ilyen nagy molekulájú merev molekulákból álló szálakat nem lehet olvadékból előállítani, a szálképzéshez a megfelelő oldószerrel oldatba kell vinni a polimert. Az aramidyszálak a molekulatömeg szerint különbözhetnek. Az alacsonyabb molekulatömegű típusokat főleg a ballisztika területén, valamint a súrlódó felületeken használják, míg a nagy modulusú szálak adják a szálak kompozitok alapját. A legnagyobb részarányt képviselő aramidyszálak mellett más nagy teljesítményű polimerszálak is vannak. Nagy jelentőségű még az ultra nagy molekulatömegű polietilénszál (PE-UHM), amely már több éve hozzáférhető a piacon. Nagy molekulatömege és orientációja jó mechanikai tulajdonságokat eredményez. A szál alkalmazását azonban alacsony lágyulási hőmérséklete korlátozza, ami azt is jelenti, hogy viszonylag alacsony hőmérsékleten elveszti formastabilitását. Apoláris, viaszos felülete miatt rossz a tapadása más anyagokhoz. A polimermatrix erősítésére más polimerszálakkal is kísérleteznek (pl. polibenzoxazol), azonban ezek egyelőre fejlesztési fázisban vannak.

## Természetes szálak: kis sűrűség

Néhány éve kifejezetten nő az érdeklődés a természetes szálak iránt. Ennek fő aktualitása, hogy csökkentsék az ipari folyamatokból származó szén-dioxid-kibocsátást. A legfontosabb természetes szálak tulajdonságait a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat

Természetes szálak tulajdonságai

Szálfajta	Sűrűség g/cm <sup>3</sup>	Szakítószilárdság MPa	E-modulus MPa	Szakadási nyúlás %	Nedvesség- felvétel %
Len	1,43–1,52	430–840	30–60	1,8–4	8–10
Juta	1,43–1,49	330–345	13–24	1,3	12,5
Rami	1,5	750–1050	28–40	2,4	12–17
Kender	1,45–1,53	420–445	–	1,8	8,5–10
Szizal	1,5	675	12–17	3–4	11

## Erősítő textilszerkezetek

A szálak textilfeldolgozásával kötött-szövött anyagot vagy fonatot állítanak elő, amelyek szintén szerepelhetnek erősítőként. *A szövetek a gyártásnál alkalmazott kötésmódtól függően különböző deformálhatóságot adnak.* Minél ritkább vagy gyengébb a fonalak lekötése, annál jobb az alakíthatóság. Gyakran használják a fektetett szerkezetet is, amelyben az egymással párhuzamosan fektetett erősítőszálakat, pl. üveg- vagy szénszálkábeleket egy sokkal vékonyabb keresztirányú fonallal kötnek le. Néhány év óta bonyolultabb textilszerkezeteket is kifejlesztettek műszaki célokra. Ilyen pl. a *multiaxiális fektetett szerkezet*, ahol egymáshoz képest elforgatott kábelkötegeket fektetnek egymásra, és az ily módon keletkezett több irányban orientált szerkezetet varrófonal rögzíti. Ez a textiltechnika jó mechanikai értéket ad kedvező költségek mellett, főleg a folyadékkal történő impregnálás esetén. Az autógyártásban széleskörűen használják erősítésre a különböző vágott szálakból álló nemszőtt termékeket, a vliéseket és a vastagabb paplanokat. A vágott szálakkal gyakran készítenek félgyártmányt, amelyből a megfelelő préseléses technológiával komplex építőelemeket tudnak előállítani.

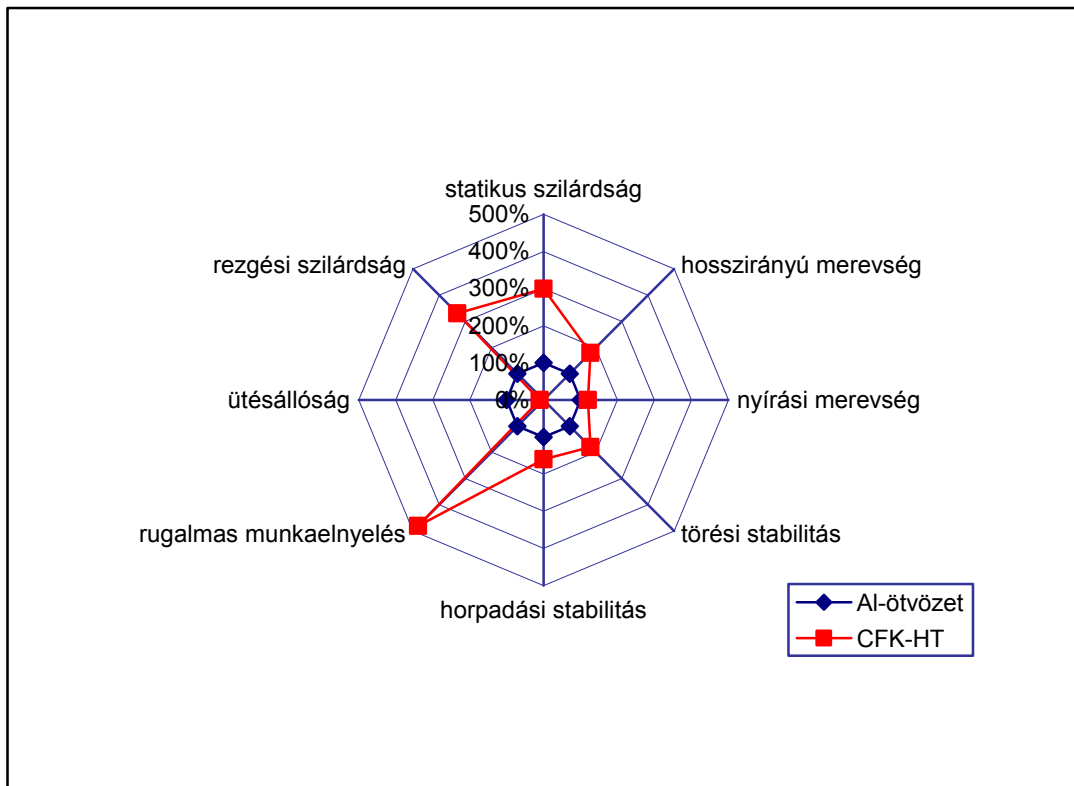
## Az erősítőszálak és textilek felületi kezelése

Az erősítőszálaknak a mátrixhoz való tapadását a szálak felületére felvitt anyagokkal lehet növelni. Különösen fontos ez pl. az apoláros szénszálnál. A felületet először online oxidációval kezelik, amely után az *aviválás* következik, azaz egy speciális anyagot visznek fel a felületre. Az aviválással felvitt bevonat egyrészt védi az egyedi szálakat a textilfeldolgozási műveletekben, másrészt fokozza a tapadást a polimer-mátrixhoz. *Ma a szénszállakat általában epoxigyantával kompatibilis anyaggal látják el*, mivel a legnagyobb teljesítményt igénylő területeken elsősorban ezt a gyantát használják mátrixanyagként. Nagyon fontos a természetes szálak felületének módosítása, ahol az idegen részecskék eltávolítása, a lignin és a hemicellulóz leoldása vezet jobb tapadáshoz.

## A szálerősített szerkezeti anyagok tulajdonságai

A szállal erősített összetett szerkezeti anyagok általában lemezes szerkezeti anyagok. Felhasználásukkor a különböző textilszerkezeteket egymásra rétegezve az anizotrópiát is figyelembe véve alakítják ki az igénybevétel szerinti optimális szerkezetet. A konkurens anyagokkal való összehasonlításhoz a sűrűsége vonatkoztatott jellemzőket kell vizsgálni. A 3. ábrán az alumínium és egy nagy szilárdságú szénszállas kompozit (CFK-HT) tulajdonságprofilja látható. A CFK-HT fajlagos mechanikai tulajdonságai az ütésállóság kivételével jelentősen felülmúlják az alumíniumét, 30%-kal kisebb tömeggel. A pozitív tulajdonságprofil kihasználásához a kompozitot jól kell feldolgozni. A gyantainjektálással megvalósított folyékony kompozit öntés (liquid composite moulding – LCM) a legelterjedtebb eljárás, amelynek különböző változatai

vannak. A csekély ütésállóságot a termék tervezésénél kell figyelembe venni. A 3. táblázatban látható, hogy a prepreg (SMC) összetételétől függően különböző mechanikai tulajdonságokat lehet elérni.



3. ábra Az alumínium és a nagy szilárdságú szénszál-asztal kompozit fajlagos jellemzőinek összehasonlítása

3. táblázat

Üvegszál-gyanta és különböző szénszál-gyanta kompozitok mechanikai tulajdonságai prepreg sajtolásával feldolgozva

Tulajdonság	SMC-GF 25%	Vinilészter+ CF 50%, 48k	Vinilészter+ CF 50%, 12k	Epoxi+CF 50%, 48k	Fejlesztett SMC, kvázi- izotróp
Húzószilárdság, MPa	80	180	220	187	347
E-modulus húzásból, MPa	13 000	27 000	30 000	33 000	33 000

Megjegyzés: fejlesztett SMC (advanced SMC) = a szénszál erősítést az üvegszál sajtolópaplanok feldolgozásmódjával társítják.

## A szálerősítésű szerkezeti anyagok piaca

A statisztikák 7 millió tonnára becsülik a szálerősítésű műanyagok piacát. Az üvegszál-felhasználást 2,2 millióra teszik, a növekedés évente 4–5% volt 1996 és

[www.quattroplast.hu](http://www.quattroplast.hu)



2003 között. Az üvegszálak piaca földrajzilag nagyjából egyformán oszlik meg Európa, az USA és Ázsia között Dél-Amerika részesedése 3%. A legnagyobb felhasználói területek: építőipar, közlekedés, hajóépítés. A feldolgozás módját tekintve Európában az üvegszálak felhasználásánál a kézzel történő laminálás, az SMC-préselés és a szórásos eljárás vezet, de jönnek fel az autógyártásban alkalmazott technikák, az üvegszálpaplannal, ill. hosszú szállal erősített termoplasztok, a GMT és a LFT.

A szénszálak alkalmazása az üvegszálakénál lényegesen kisebb körű, 2006-ban 30 ezer t alatt volt, aminek döntő részét Európában, az USA-ban és Japánban használták fel. A következő évekre 10–12% növekedést várnak évente, amelyet Európa fog vezetni. A szélenergiáművekhez és a különböző szállítóeszközökhöz, a sporteszközökhöz és a repülés- és űrtechnikai alkalmazásokhoz egyre több szénszál szerkezetet fognak használni.

A para-aramidszálak 50 000 tonnás termelését mindössze két cég adja: a DuPont és a **Teijin**. Az aramidszálak alkalmazását szűkíti a nyomással szembeni kisebb ellenállás. Az aramidszálak mint erősítő szálak fő alkalmazási területei a ballisztika, a különböző súrlódó betétek, kuplungok, az optikai kábelek és az autógumik. Vannak, akik ezen a területen is 8–10% növekedést várnak.

A különböző erősítőszálak piaca eltérő képet mutat mind a mennyiségeket, mind a növekedési lehetőségeket illetően. Míg az üvegszál szerkezetek mára telítettségi szintet értek el, addig a természetes szálak felhasználása előtt még sok lehetőség nyitva áll. A szénszálak terjedését elsősorban a szűkös gyártókapacitások és a magas árak korlátozzák.

Összeállította: Máthé Csabáné dr.

Ziegmann, G.: Mehr Leistung, geringeres Gewicht. = Kunststoffe, 97. k. 4. sz. 2007. p. 106–115.

Bittmann, E.: Das schwarze Gold des Leichtbaus. = Kunststoffe, 96. k. 3 sz. 2006. p. 76–82.

## Röviden...

### **Klimatizálás helyett latens hőelnyelés műanyaggal**

A **BASF** kifejlesztette a *Micronal PCM* nevű speciális anyagot, amely az építőanyagokban látens hőelnyelő hatást fejt ki. A műanyag szemcsébe ágyazott viasz a nyári hőmérséklet-emelkedés hatására megolvad, és ezzel hőt von el a környezetéből. A hőmérséklet visszaesésekor pedig a viasz megdermed, és a tárolt hőt visszaadja a környezetnek. Az anyagban lejátszódó fázisátmenet nem jár együtt a közeg hőmérsékletének megváltozásával, hasonlóan a jég-víz átmenethez. A különböző építőanyagokba (vakolat, beton, gipsz, stb.) bekeverhető *Micronal PCM*-mel jelentősen lehet csökkenteni a nyári hőszégekben a klimatizálás költségeit.

[www.micronal.de](http://www.micronal.de)

O. S.

[www.quattroplast.hu](http://www.quattroplast.hu)