

# Polimer kompoziterősítő szálak tulajdonságai

Szabó Lóránt

Óbudai Egyetem RKK KMI  
szabo.lorant@rkk.uni-obuda.hu

**Kulcsszavak/Keywords:** Műszaki szálanyagok, Húzószilárdság, Húzó rugalmassági modulus, Technical fibres, Tensile strength, Tensile modulus

## Summary

Manufacturing of fibre reinforced polymer composites is a dynamically growing industry by its excellent properties. In engineering practice the comparison of mechanical properties of structural materials is more characteristic by featuring material weight than referencing to cross section. From the comparison of materials it is clear, that hardness of fibres used to reinforce polymers significantly exceeds the hardness, elasticity and tensile strength of steel and aluminium structures.

## Összefoglalás

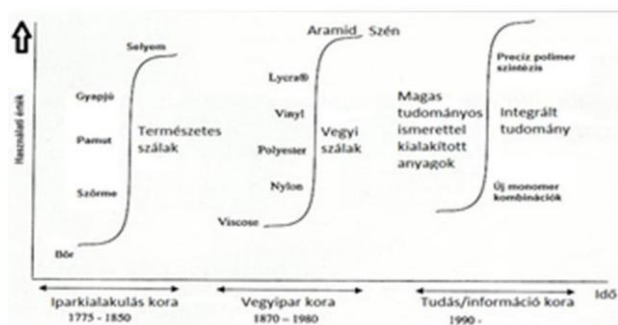
A szálerősítésű polimer kompozitok gyártása a kiváló tulajdonságaik révén dinamikusan növekvő iparág. A szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak összehasonlítását a mérnöki gyakorlatban a keresztmetszetre való vonatkoztatás helyett az anyag használat szempontjából kifejezőbb súlyára megadni. Az anyagok összetételéből kitűnik, hogy a polimerok erősítésére használt szálak jelentősen, akár nagyságrenddel is felülműlják az acél- és alumíniumszerkezetek szilárdságát és húzási rugalmassági modulusát.

## Bevezetés

A múlt század második felében az ember által használt anyagok területén alapvető tendenciaváltozás következett be: a fémek szerkezeti anyagok rovására a polimerok és a kerámia anyagok alkalmazása dinamikus fellendülést mutat.

A textilipari szálak iránti növekvő igény kielégítésére az 1800-as évek végén – a kémiai-, a polimer- és a szálgyártás fejlesztésének köszönhetően – sikerült mesterséges úton szálanyagokat előállítani. A mesterséges szálak fejlesztésében, gyártásában – a különleges műszaki igényeknek való megfelelésnek köszönhetően – napjainkra döntő változás következett be, széles, különleges igényt támasztó területeken kulcsfontosságúvá váltak. A különböző időszakokban használt textilszálak fejlesztési szakaszait az 1. ábra szemlélteti.

A textilszálak feldolgozásának gépesítése több mint 200 évre nyúlik vissza, az első ipari forradalom is a textilipari műveletek (fonás, szövés) gépesítésével kezdődött.



1. ábra



2. ábra

A szál fogalom az átmérőjéhez képest nagyságrendekkel nagyobb hosszúságú anyagokat jelöli, ez az alak a textiliparban feldolgozott szálakra jellemző. A műszaki textiliákat és a kompozit erősítésű textilszerkezeteket is nagyjából az ismert textiltechnológiai eljárások valamelyikével állítják elő.

A szálanyagok iránti igény töretlenül növekszik egyrészt a népességnövekedés (a Föld lakossága immár 7 milliárd fő), másrészt az egyre sokoldalúbb textilszál-felhasználás és igénynövekedés következtében (az egy főre eső textilszál felhasználás ez idő szerint 11,2 kg/fő).

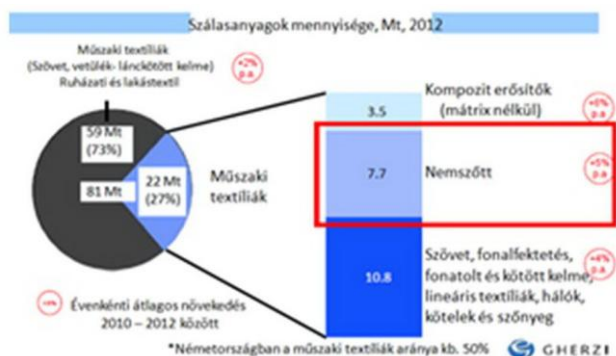
A különböző szálanyagok mennyiségét, azok feldolgozási sémáját a 2. ábra mutatja [1]. 2012-ben a világon felhasznált 81 millió tonna szálanyag 27%-a (22 Mt) volt műszaki textília (3,5 Mt szálerősítő kompozit; 7,7 Mt nemszótt és 10,8 Mt műszaki textil kelme (3. ábra) [1]. A műszaki textiliák földrészenkénti gyártásának évenkénti várható növekedését a 4. ábra szemlélteti [1].

A könnyű gépszerkezeti anyagok gyártásának kezdetét, a gyártási volumen felfutását az USA-ban az I. táblázat tartalmazza.

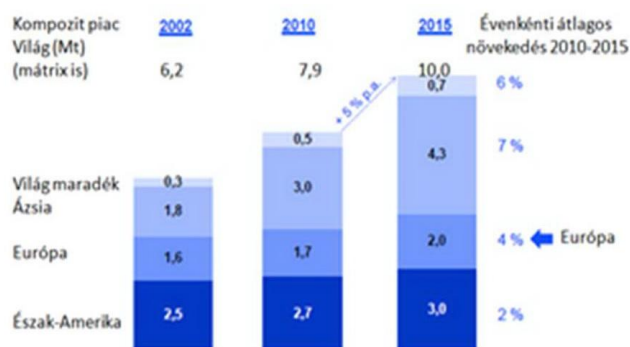
Az új, nagy teherbírási szálak értéke sok esetben akár nagyságrendekkel is felülműlják a tömegesen használt szálanyagok árát. Remélhető azonban, hogy

I. táblázat. Könnyű szerkezeti anyagok gyártása az USA-ban

Alumínium-, E-üveg-, aramid- és szénszál ipari bevezetése és a termelés felfutása az USA-ban	Al	E-üveg	Aramidok	Szénszál
A gyártás kezdete	1885	1931	1965	1968
Évek, amíg a gyártás elérte az 1000 t/évet	10	14	10	14
Évek, amíg a gyártás elérte a 3000 t/évet	17	19	13	25



3. ábra



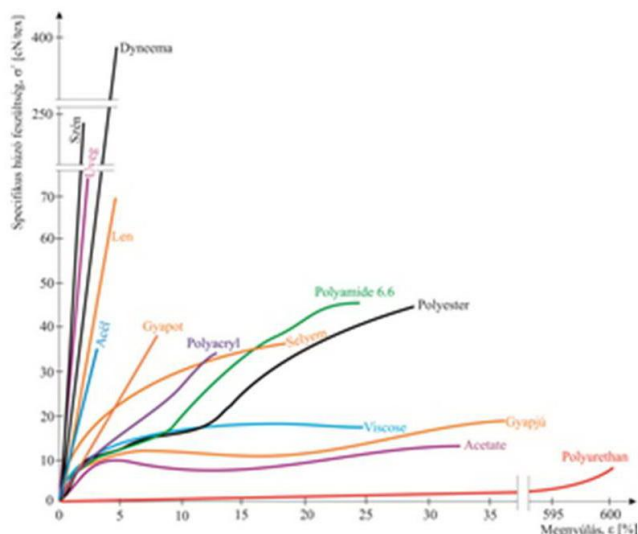
4. ábra

az ún. high-tech szálak gyártási, feldolgozási technológiájának fejlesztésével az árak csökkenthető, így egyre több területen való alkalmazásuk várható.

A szálak és textilák legdinamikusabb fejlődése a műszaki textilák és kompozit szálerősítő anyagok területén tapasztalható. A fejlettebb ipari országok textil-ipari fejlesztései, a gyártás súlypontja napjainkban a műszaki és a kompozitokban használt erősítő textilák területére helyeződött át. Az új, különleges tulajdonságú textilanyagokból készített termékek iránt a felhasználói igények minden korábbi elképzelést felülmúlnak, ami a szál gyártásától a késztermék előállításáig különös erőfeszítést, szaktudást igényel. A szálak tulajdonságait, a feldolgozási technológiákat a felhasználói kívánságok és a textil szempontokat figyelembe véve alakítják ki.

A textilszál fajták összetétele, aránya és feldolgozás változásának néhány jellemzője:

- a mesterséges szálak részaránya a 60%-ot is meghaladja,
- a poliészter szál kedvező ára és tulajdonágai révén a legnagyobb mennyiségben használt szálanyag (35,5 Mt),
- az elemiszálak finomságának széles tartománya, a szálak finomodása, mikro- és nanoszálak,
- a különleges funkciójú bikomponens szálak jelentősége növekszik,
- a szálak mechanikai tulajdonságainak széles skálája, nagy szilárdságú, húzási rugalmassági modulusú szálak (5. ábra) [2],
- széles tulajdonság-tartományú fonalak (nagy



5. ábra

nyúlású elasztomerek, törékeny kábelek) feldolgozása,

- a védelmi funkcióknak való megfelelés (hő-, vegyszer- és tűzállóság, nagy LOI érték) előtérbe kerül,
- a szálak egyre nagyobb hányadának filament („végtelen”) formában való feldolgozása,
- a hagyományos lapképző technológiákon (szövet, kötés) túlmenően a nemszött, a fonalfektetési (NCF Non Crimp Fabrics – nem hullámos kelmeszerkezet) és a fonatolási technológiák egyre szélesebb területen történő alkalmazása stb.

A látványos textil újdonságokon túlmenően a részletekre, a feldolgozási körülményekre is nagy figyelmet fordítanak. A textilák feldolgozására döntő befolyással van a gépalkatrészek textiliával érintkező felülete, minősége, valamint a szál alakja, felületkezelése. Emiatt a mechanikai technológiák elengedhetetlen kísérője a szálak felületének vegyi kezelése a feldolgozhatóság javítására, a végső felhasználási elvárásoknak megfelelően. A jó minőség biztosítása, a hatékony, automatizált gyártás elengedhetetlen feltétele az elektronika széleskörű alkalmazása, a textiltípusok egy szál erősítésű kompozit szerkezeti anyagok használata.

## A kompoziterősítő szálak általános jellemzői

A kompozitok erősítésére különlegesen nagy szilárdságú és kis nyúlású szálakat használnak, a mennyiségi növekedés és technológiai fejlesztés dinamikus.

A szálak hosszirányú mechanikai tulajdonságaikkal jellemezhetők. A mesterséges szálak molekulaszervezete, geometriai tulajdonságai a gyártás során alakíthatók ki, ezáltal a mechanikai tulajdonságok és a feldolgozási technológiák és viszonyok megtervezhetők.

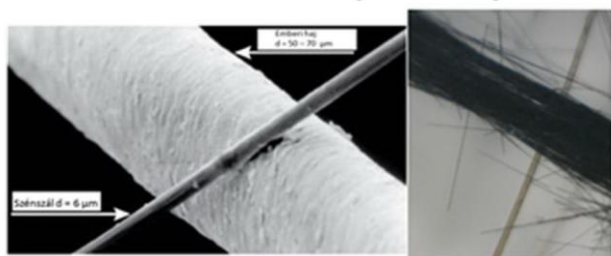
A szálátmérő csökkentésével a szálanyagok fajlagos szilárdsága növekszik (6. ábra), ami egyrészt a szálgyártáskor előforduló hibák kisebb valószínűségével, másrészt a gyártáskori nagyobb nyújtás révén, a molekulaszervezet tengelyirányú elrendeződésével is magyarázható.

A kompoziterősítő szálak általában kis nyúlásúak,



6. ábra

## Szénszál és a haj átmérője



7. ábra

nagy a húzási rugalmassági modulusuk, merevek, törekenyek. A kisebb átmérőjű szálak hajlékonyabbak, ami a feldolgozhatóságukat elősegíti. A kompoziterősítéshez használt szálak hajlítási merevségének csökkentésére, a feldolgozhatóság javítására általában kis átmérőjű (5–14 μm) szálakat használnak, ez az átmérő az 50–70 μm átmérőjű hajszálénak 10–20%-a (7. ábra).

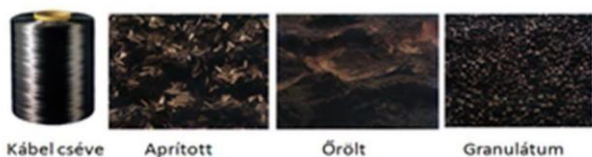
A 80–120 nm átmérőjű ún. nanoszálak iránt is fokozott érdeklődés mutatkozik a kompozitok erősítésére. Ezeknek a szálaknak nagy fajlagos felülete a mátrixszal kiváló kapcsolódást tesz lehetővé.

A kompoziterősítő szálak általában kör keresztmetszetűek. A szálátmérő és a szál fajlagos sűrűsége ismeretében a textiliparban használatos mérőszámok (finomsági számok) számítással is meghatározhatók. A szálátmérő megadásán túlmenően a kábel, a cérna finomságát a textiliparban használt különböző rendszerekben adják meg. A szénszálak átmérője többségükben 7 μm, ez kb. 0,7 dtex szálfinomságnak felel meg. A kábel (*tou*-nak – ejtsd kb.: tou – nevezik) vastagságát a benne lévő filametek 1000-ben (K) kifejezett számával jellemzik; az 1K (azaz 1 ezer filamentet tartalmazó kábel), 3K, 12K, 24K vékony, az 50K, 60K, 320K vastag kábelt jelent.

A kompoziterősítő szálakat a szálgyártás során felületkezelést (*sizing*, ejtsd: szájzing) követően kábellel egyesítve keresztcséve formában szerelik ki.

A nagy merevségű, sodratlan kábeleket (ezt üveg-szálak esetén *roving*-nak, szénszálak esetén *tou*-nak nevezik) közvetlenül a gyártandó anyagba fektetve, valamely lapképző eljárással (szövés, fonatolás, fektetett kábelek kötéstehnológiái – ún. varrvahurkolási – eljárással való rögzítése) feldolgozva, anizotróp (a terhelésnek megfelelő irányba rendezett szerkezetű) kompozit gyártható. A merev filamentekből álló kábelek kiterítve való feltépésével, belőlük – a kártolás kiiktatásával – font fonál gyártható. A nem túl merev kábelek terjedelmesítést követően adott hosszra vágva (*staple fiber/yarn*, ejtsd: sztépl fájber/járn) rövid- vagy hosszszál-fonási eljárással dolgozhatók fel.

A kábelek extruderbe való közvetlen bevezetéssel, aprított, őrölt granulátum, vagy *pellet* (rövidszál és mátrix keveréke) formájában izotróp kompozitok gyártását teszik lehetővé (8. ábra).



8. ábra

Szál	Szerkezet	Jellemzők
Szén		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D Kovalens kötés</li> <li>• Parakristály (100%)</li> <li>• Magas orientáció</li> </ul>
P-aramid		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D Kovalens kötés</li> <li>• Hidrogén kötés és Van der Waals kötés</li> <li>• Parakristály (100%)</li> <li>• nagyon magas orientáció</li> </ul>
Üveg		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D-s kapcsolódású izotróp szerkezet</li> <li>• Kovalens kötés a szilícium és a hidrogén között</li> </ul>

9. ábra

A kompozit erősítésre használt szálak és azok tulajdonságai széles területet ölelnek fel. Anyaguk lehet

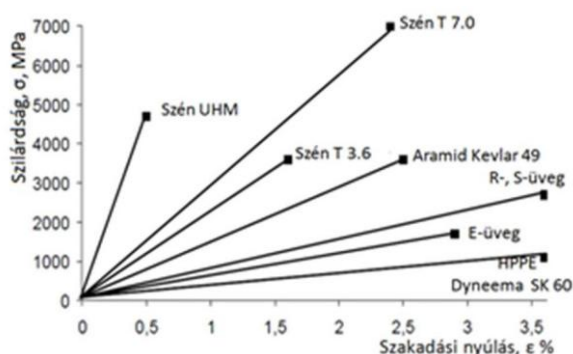
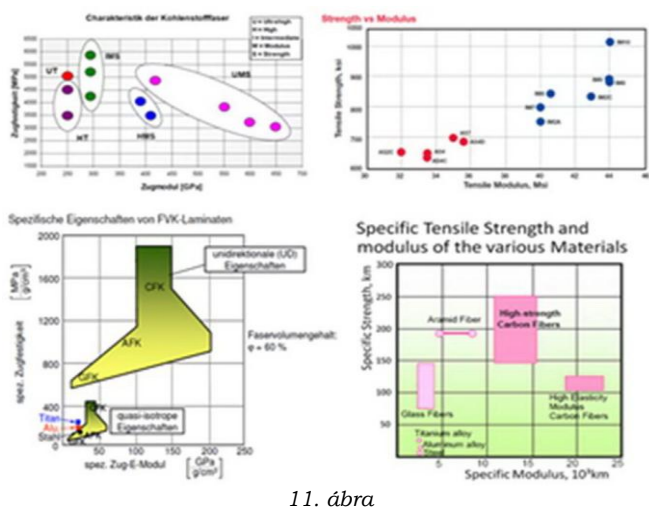
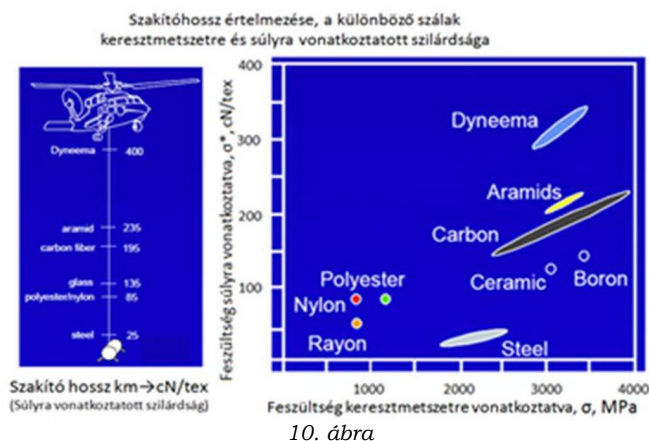
- üveg (E, R vagy S típus),
- szénszál (pl. AKSACA, HexTow, Panex, Pyrofil, Sigrafil C, Tenax, Thornel P-25 Pitch-Based Fibre, Torayca),
- bazalt,
- kerámia,
- kvarc,
- boron,
- fém- ill. fémezett szálak,
- para-aramid szálak (pl. Kevlar, Technora, Twaron),
- folyékony kristályokból álló polimer (LCP – liquid crystal polymer), pl. Vectran,
- nagyon nagy molekulásúlyú (UHMW – ultra high molecular weight) polietilén (PE) (pl. Dynema),
- PBO (p-phenilene-2,6-bensobisoxabole, pl. Zylon),
- nagyszilárdságú polietilén-tereftalát (PET), poliamid (PA), polipropilén (PP), viszkóz (CV),
- természetes alapanyagú szálak (kender, len, juta, rami).

## A kompoziterősítő szálak tulajdonságainak összehasonlítása

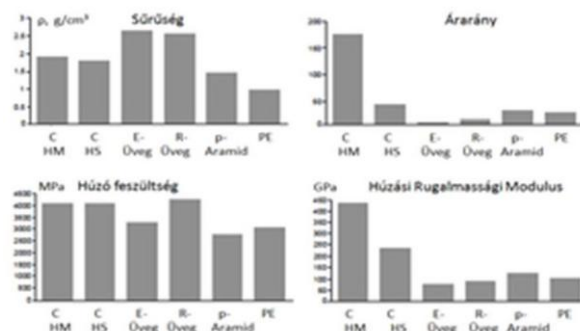
A kompozit erősítő szálak kiindulási anyaga (szerves, szervetlen) és molekulaszerkezete lényeges különbségeket mutat (9. ábra).

A kompozitok, így a kompoziterősítő szálak is a fém szerkezeti anyagok versenytársai, számos fontos területen vezető pozícióra tesznek szert. A kompoziterősítő szálaknak a kompozit tömegre vonatkoztatott mechanikai tulajdonságai – az acélnál számottevően kisebb anyagsűrűségnek is köszönhetően – egy nagyságrenddel is felülmúlják az acélszerkezetek mechanikai tulajdonságait, emellett számos további előnyös tulajdonsággal is rendelkeznek.





A mechanikai tulajdonságokon belül különösen fontos a szálak húzószilárdsága és húzó rugalmassági modulusa. A mérnöki gyakorlatban a szilárdságot és a merevséget is a felületegységre vonatkoztatva adják meg, az SI mértékegység-rendszerben pascalban (Pa), azaz N/m<sup>2</sup>-ben, angol nyelvterületen 1 négyzethüvelykre (sqi) vonatkoztatva. A textilszálak sűrűsége a fém szerkezeti anyagokhoz – különösen az acélhoz – viszonyítva számottevően kisebb, emiatt a mechanikai tulajdonságokat, a használatot jobban kifejező, a szerkezet súlyára vonatkoztatva célszerű megadni (a kilométerben kifejezett szakítóhosszal, vagy az azzal megegyező számértékű cN/tex-ben) (10. ábra). A szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak megadására számos mértékegységet (súlyra, tömegre vonatkoztatva)



és különböző mértékrendszereket használnak (lásd a 11. ábra példáit).

A kompoziterősítő szálanyagok feszültség–nyúlás diagramja is nagy különbözőséget mutatnak (12. ábra) és egyéb tulajdonságaikban – még az adott szálfajtán belül is – lényeges különbségeket tapasztalhatunk (II. táblázat, 13. ábra). A három meghatározó kompoziterősítő szál tulajdonságainak szubjektív megítélése a II. táblázatban található. Az adott felhasználási célra a legmegfelelőbb szál az igények és költségek figyelembe vételével célszerű kiválasztani.

II. táblázat. Három szálfajta szubjektív megítélése

Tulajdonság	Szén	Üveg	Para-aramid
Szál izotrópia	–	+	–
Húzó szilárdság	++	+-	+
Húzó modulus	+	–	+-
Ütközés-csillapítás	–	+-	+-
Nedvesség felvétel	++	+	--
Kúszás	++	+-	++
Elektromos vezetés	++	–	–
Vegyszerekkel szembeni ellenállás	++	++	++
Hővel szembeni ellenállás	++	+	++
Kötődés a mátrix-szal	+	+	–
Gyárthatóság	–	+-	+-
Elektrokémiai korrózió alumíniummal	--	+	+
Ár	--	++	–

## Irodalom

- Gherzi: Technical Textiles Messe Frankfurt 2013. 06. 04.
- R. Szabó, L. Szabó: New textile technologies, challenges and solutions. XXIII. Congress of IFATCC, Budapest, 2013. 05. 08–10. p. 11.
- Gardiner G.: The making of glass fibers. Composites Technology 2009/4.
- Borbély E. – Szabó R.: Black Magic; The Present and the Future Application of Carbon Fibers. 1st Regional Conference – Mechatronics in Practice and Education MECH – CONF 2011, Szabadka, 2011. dec. 8–10. p. 75–79.
- Borbély E. – Szabó R.: Szénszál a jövő autóiban. Gyulafehérvár
- The fiber Composites World, 1/8/2009
- Szabó L.: A szerkezeti anyagok használatának új korszaka. SzámOkt 2012. XXII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia Gyulafehérvár, p. 351–357.