

A XXI. század szerkezeti anyaga a szénszál

Kovács József*

A St. Louis-i székhelyű Zoltek cég tulajdonában lévő Zoltek Magyar Viscosa Rt.-nél 1997. július hónapban megkezdődött a kísérleti szénszálgyártás.

A történet 1995. december 8-án kezdődött, amikor a Magyar Viscosa Rt. privatizációja lezárult és a részvények közel 100%-a a Zoltek cég tulajdonába került. Az új tulajdonos a világ egyik legjelentősebb szénszálgyártója.

Nyergesújfalun nemzetközi mércével mérve is jelentős szénszál- és prekurzorgyártó kapacitás létrehozása kezdődött meg. Várhatóan augusztus második vagy szeptember első felében a kísérleti gyártás nyomán megkezdődik az ipari méretű szénszálgyártás hazánkban. Ennek apropóján, egy rövid történeti áttekintés után, ismertetem a hazánkban még alig ismert szénszál legfontosabb tulajdonságait.

Történeti áttekintés

A század elején Thomas Edison alkalmazott először elszenesített szálát izzószálként a kifejlesztés alatt levő izzólámpában. Az elszenesítésre bambuszt és viszkózszelymet használtak. A későbbiekben a szénszálakat csak viszkózszelyemből készítették, és hőszigetelő anyagként alkalmazták. Azonban ez az anyag nem volt versenyképes az üvegszállal, mivel az említett elszenesített szálak nem a mai nagy hőmérsékletű kezelési útján készültek, és nem rendelkeztek a mai szénszál (CF) kiemelkedő mechanikai és vegyi tulajdonságaival. A nagy szakítószilárdságú szénszálak kifejlesztésének a Wright-Patterson Repülőgyár által megkezdett munka adott lendületet az ötvenes években.

A hidegháborús időszak végéig a szénszál alkalmazási területei az űrkutatás, az atomenergia-ipar, a rakéte technika, a repülőgyártás és a haditechnika voltak, mivel ezeken a területeken a szénszál alkalmazásával jelentős eredményeket lehetett elérni, így a magas ár (200–500 USD/kg) nem játszott szerepet. Azonban a piac is meglehetősen behatárolt volt, így kialakult a magas ár → alacsony piacigény → kis mennyiségű termelés → magas ár ördögi köre.

A kelet-európai változások következtében ez a piac is elveszni látszott a hadiipari költségvetés nagyarányú csökkenése folytán. Ekkor alapvető piaci szemléletváltásra volt szükség. Élenjáró szerepet játszott és napjainkban is játszik a Zoltek Corp., mivel felismerte, hogy a kitorrés útja a termelés automatizálásával, a termelési volumen feltuttatásával az árak csökkentése és a piac jelentős kiszélesítése. A Zoltek által tervezett piaci ár 2000-ben: 11 USD/kg.

Napjainkban **szénszálakat készítenek** viszkózszelyemből, kátrányból és poliakrilnitrilből (PAN). A PAN alapú szénszálgyártás a legelterjedtebb, amely két lépésben történik: egy nyújtással egybekötött oxidálásból (stabilizálás) és egy nagy hőmérsékletű inert atmoszférában történő szenesítésből áll.

Szilárdsági jellemzők

A szakítószilárdság és a Young-modulus szempontjából a CF az alábbiak szerint osztható:

Kiemelkedően nagy modulus (Ultra High Modulus, UHM)	$E_y > 450$ GPa
Nagy modulus (High Modulus, HM)	$E_y > 350$ GPa
Közepes modulus (Intermediate Modulus, IM)*	$E_y > 200$ GPa
Kis modulus (Low Modulus, LM)	$E_y < 100$ GPa

* Zoltek Magyar Viscosa Rt. Szénszál üzletág

Szuper nagy szakítószilárdság

(Super High Strength, SHT)

$\sigma_s > 4,5$ GPa

Nagyon nagy szakítószilárdság

(Very High Strength, VHS)

$\sigma_s > 4,0$ GPa

Nagy szakítószilárdság

(High Tensile Strength, HT)*

$\sigma_s > 3,0$ GPa

* A Zoltek-termékek az IM és a HT kategóriákba tartoznak.

A CF szilárdsági jellemzőit az I. táblázat alapján összehasonlíthatjuk az acél, az alumínium, a titán, az E és az S üvegszálak jellemzőivel. A jobb összehasonlíthatóságot segítik a sűrűségarányos E_y/γ modulusz és a σ_s/γ szakítószilárdság mérőszámok, amelyekkel az egységnyi tömeggel biztosítható merevséget és szilárdságot jellemezhetjük. Ennek jelentősége a légi, a vízi, a vasúti és a közúti szállításban van, de nem elhanyagolható a forgó alkatrészeknél és a tartószerkezeteknél sem.

I. táblázat

Szerkezeti anyagok szilárdsági jellemzőinek összehasonlítása

Anyag	E_y GPa	σ_s MPa	sűrűség g/cm ³	E_y/γ MJ/kg	σ_s/γ kJ/kg
CF	228	3600	1,78	128,1	2022
Acél	206	420	7,80	26,4	54
Alumínium	69	260	2,56	27,0	101
Titán	112	980	4,45	25,0	220
S üveg	85	4500	2,49	34,1	1807
E üveg	56	1560	1,95	28,1	800

Szokás még valamely anyagot a többihez viszonyítva is értékelni az azonos jellemzők hányadosával, mint dimenzió nélküli mérőszámmal. Esetünkben a CF szénszál és más anyag (A) sűrűségarányos jellemzőinek hányadosait, azaz a $(E_y/\gamma)^{CF}/(E_y/\gamma)^A$ illetve $(\sigma_s/\gamma)^{CF}/(\sigma_s/\gamma)^A$ viszonyszámokat a II. táblázat szemlélteti.

II. táblázat

Anyag (A)	Acél	Alumínium	Titán	E üveg	S üveg
$(E_y/\gamma)^{CF}/(E_y/\gamma)^A$	4,85	4,74	5,12	4,49	3,76
$(\sigma_s/\gamma)^{CF}/(\sigma_s/\gamma)^A$	37,40	20,02	9,19	2,53	1,12

A dimenzió nélküli mennyiségek segítségével könnyen végezhetünk összehasonlító számításokat, például egy adott szakítószilárdság biztosításának anyagszükségletéről és költségeiről.

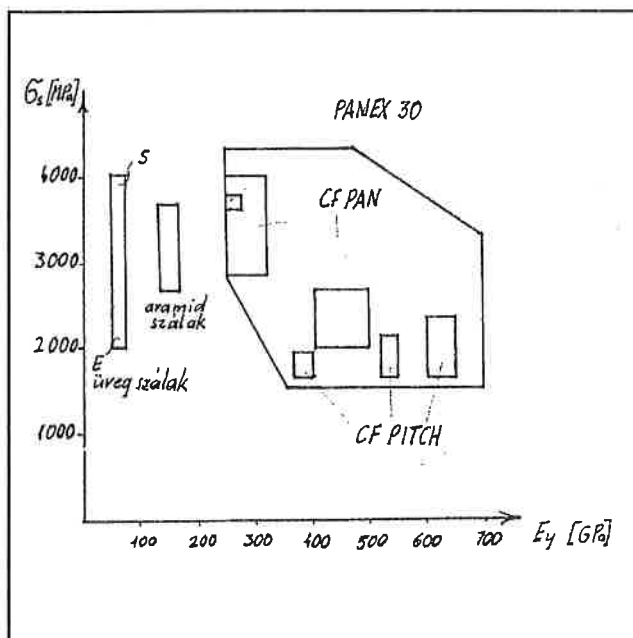
Az összehasonlító számítások alapjául a Zoltek termékét, a Panex 33 szénszál szilárdsági jellemzőit vettük figyelembe.

Az összehasonlító adatok alapján igazolódik a szénszálak alapszlogenje: **A szénszál szilárdabb, mint az acél, merevebb, mint a titán és könnyebb, mint az alumínium.**

Az ábrán az üvegszálak, az aramid szálak és a szénszálak egymáshoz viszonyított elhelyezkedését láthatjuk a szilárdsági jellemzők mezejében.

A szénszál az előnyös szilárdsági tulajdonságain kívül még a következő tulajdonságai miatt is kiemelkedik a többi ipari, illetve textilipari szál (szálasanyag) közül:

- kiemelkedő a vibrációt tompító képessége,
- alacsony csúszási tendencia,



- vegyileg semleges,
- korrózióálló,
- kicsi a hőtágulási együtthatója,
- jó a hővezető képessége,
- jó a hő- illetve tűzállósága,
- kicsi a röntgensugárzást elnyelő képessége,
- nem mágneses, illetve nem mágnesesíthető,
- jó az elektromos vezetőképessége,
- biológiailag kompatibilis,
- a gyártás utolsó stádiumában („sizing”) a szénszál előkészíthető arra, hogy az alkalmazandó matrix anyaghoz vegyileg is kapcsolódjon.

Szénszál erősítésű kompozitok

A szénszálak mechanikai tulajdonságait és hőállóságukat tekintve felülmúlják a polimer Aramid-, a (HM-PE)- és az üvegszálakat. Ez azt jelenti, hogy a nagy teljesítményű kompozitok közül a szénszálaknak van a legszélesebb alkalmazási területe. Tekintsük át a különböző szénszál-erősítésű kompozitok fajtáit röviden.

Szénszál erősítésű polimer matrixú kompozitok (CFRP – Carbon Fiber – Reinforced Polymer)

A szénszál kiváló erősítő anyaga a műanyagoknak, mivel a műanyagok önmaguk is szívósak, merevek és kis fajsúlyúak. A CF nagy modulusza a kompozitot még merevebbé teszi és mivel a műanyagoknak jók az adhéziós tulajdonságai a CF-hez, így egy kiváló minőségű struktúrát képesek alkotni.

A III. táblázatban láthatjuk a CF hatását, mint erősítő anyagét a Nylon 6/6 matrix mechanikai jellemzőire.

III. táblázat

Tulajdonságok	Nylon 6/6	30% örölt CF	30% vágott CF	30% CF Tows
Szakítószilárdság (MPa)	77	111	245	280
Young-modulusz (GPa)	2,8	8,9	10,2	11,6
Hajlítószilárdság (MPa)	112	177	357	372
Hajlító modulusz (GPa)	2,9	10,4	20,2	21,6
Nyomószilárdság (MPa)	63	98	–	–
Hőtágulási együttható (10 ⁻⁴ cm/°C)	2,05	0,68	0,48	–
Elektromos ellenállás (Ω/cm)	10 ⁵	10 ³	10 ²	–

A szénszálakat különböző formában alkalmazhatjuk a kompozitok előállításánál: kábel, fonal, prepreg anyag, szövet, gyékényszövet, labdac, különböző zsinór, fonat, örmény, vágott szál.

A VI. táblázatban az epoxi matrixba ágyazott kétfajta szénszövet alkalmazásával nyerhető tulajdonságokat láthatjuk.

IV. táblázat

Tulajdonság	Erősítő szövet	
	Atlasz selyemszövet	vászoniszövet
Szakítószilárdság (MPa)		
láncirányban	628	559
vetületi irányban	628	559
Young-modulusz (GPa)		
láncirányban	70	66
vetületi irányban	70	66
Nyírószilárdság (MPa)	63	66

A CFRP kompozitok felhasználási területei:

- a repülőgép- és autópárház kardántengelyek, karosszéria-elemek, forgó alkatrészek, akkumulátorházak, valamint tűzálló, nagy szilárdságú belső borítóelemek és padlószervezetek gyártásához;
- szállító konténerek, tartályok, metántartályok készítéséhez;
- szerkezetek, például hidak, műemlékek, utólagos megerősítéshez;
- az építőiparban tűzálló ajtók és falak készítéséhez;
- sporteszközök, például teniszütők, sílecek, golfütők gyártásához.

Szénszál erősítésű szénmatrixú kompozit

(CFRC Carbon Fiber – Reinforced Carbon)

A CFRC kompozitok kitűnő tulajdonságokkal rendelkeznek magas hőmérsékleten a CF és matrixanyag kiváló hőterhelhetőségének köszönhetően. Következésképpen kiválóan alkalmazhatóak nagy olvadáspontú anyagként a bonyolult tervezési területeken, mivel megfelelő szilárdságúak és vegyileg semlegesek még a rendkívül magas, 1500°C feletti hőmérsékleteken is.

A CFRC kompozit kiválóan alkalmazható például keréktékettétként, vagy az űrhajózásban és a rakétatechnikában például az orrszél burkoló anyagként.

Fékként történő alkalmazása mellett az anyagnak három tulajdonsága is szól:

- Az első, a szerkezetnél elérhető *súlycsökkenés*; például a vadászpilótaegységnek a CFRC tárcsafékek alkalmazásával 70%-os súlycsökkenést sikerült elérni a fékrendszerrel, ami fékezett kerekeként 60–100 kg tömeg-megtakarítást jelent. Ez a tömegcsökkenés egy szállítórepülőgép esetén ennek a többszöröse is lehet, ami, a felszállási súly állandóságát elfogadva, komoly hasznosítási növekedést jelent. Ezek a megfontolások igazak a nagy méretű szállító közúti és vasúti járművek esetén is.

- A másik, az anyag nagy *hőterhelhetősége*. Köztudott, hogy fékezéskor a jármű mozgási energiája súrlódási munkává alakul és hőenergia formájában jelenik meg; ezt a hőt folyamatosan el kell vezetni a fékrendszerrel, ellenkező esetben a fékhatás csökken, illetve megszűnik. Amíg a hagyományos fékek esetén a hőmérséklet 1000°C-ra emelkedése esetén a fékek súrlódási tulajdonságai teljesen leromlanak és még a szilárdsági tulajdonságai is csökkennek, sőt további hőmérséklet-emelkedés esetén az anyag megfolyása is előfordulhat, addig a CFRC fékek alkalmazása esetén a fékbetét megőrzi súrlódási tulajdonságait több, mint 2000°C-ig és a kompozit szilárdsági tulajdonságai még javulnak is, hiszen a CFRC szilárdabb 2000°C-on, mint 20°C-on.

- A harmadik tulajdonság: a *jó hővezető képesség*, amely a

keletkezett hőenergia viszonylag gyors elvezetését és átadását biztosítja a fékrendszerrel a környezetbe.

Ezen tulajdonságok alapján a CFRC kompozitok előtt nagy piaci perspektíva látható, nemcsak a repülőiparban, de a nagy tömegű gépjárművek és vasúti járművek esetén is. Különösen fontos az alkalmazása a hegyi közlekedésben résztvevő közlekedési eszközöknél, mivel itt a helyzeti energia átalakítása is a fékek feladata.

A jó súrlódási tulajdonságai miatt a CFRC kompozit teret nyerhet még a súrlódó tengelykapcsolók betéteiként is.

Szénszál erősítésű fémmátrixú kompozit

(CFRM Carbon Fiber Reinforced Metal)

A fém mátrixú kompozitok előállítása sokkal bonyolultabb, mint az organikus mátrixú kompozitoké, mivel a gyártási folyamat nagy hőmérsékleten és nyomáson megy végbe.

CFRM kompozitnak három ismert gyártási eljárása van:

- a diffúziós bevonás,
- a galvanizálás és
- a folyékony fém beszívárogatás.

A legismertebb CFRM kompozitok:

CFR – Alumínium: galvanizálással, illetve folyékony fém beszívárogatással készül. A kompozit tulajdonságai azt mutatják, hogy a szénszál kedvező tulajdonságai jól érvényesülnek a kompozitban.

CFR – Ólom – ón-ötvezt: jó siklasi tulajdonságokkal rendelkezik, kiváló csapágyfém.

CFR – Nikkel: a gyártási eljárás rendkívül bonyolult és költséges. A kompozit nagy hőmérsékleten vagy oxidációs környezetben elveszti kedvező tulajdonságait. Ez a kompozit nem túl elterjedt.

Feszített betonszerkezetek

Előfeszített szerkezetek: az előfeszített szénszál pászmákat kiöntik betonnal és kötés után az előfeszítés mintegy nyomja a szerkezetet. Áthidaló szerkezeteknél a húzófeszültséget közömbösíti ez az eljárás.

Utófeszített szerkezetek: a betonelemben kialakított csatornába bevezetik a szénszál pászmákat, és a beton kötése és az elem beépítése után a pászmákat a várható terhelésnek megfelelően megfeszítik. A szénszál különösen előnyös tulajdonságai ebben az esetben a szilárdsági jellemzőkön kívül a korrózióállóság, és speciális esetekben, a nem mágnesesség.

Szálerősítésű beton (szálasbeton, „hajasbeton”)

A beton keverésekor vágott szálat adagolnak az anyagba. A kevert szálak javítják a szívósságot. A töréshatáron a törés sokkal nagyobb alakváltozás után következik be.

Lőttbeton illetve löthabarc technológiával a kevertszálas anyagokat elterjedten alkalmazzák alagutak belső védőrétegének a kialakításához, mivel egyszerűbb, mint egy tartóháló felszerelése a burkolás előtt.

A szénszál szövetek, illetve kötött termékek alkalmazási körei

A szénszál szövetek a hőárrékoló, elsősorban a hőszugárzás elleni védelmi szerkezetek és a kompozitok erősítő anyaga, a hőálló szálítószalagok alapanyaga.

A szénszál háló a hő-, illetve vegyszerálló festékek, bevonatok alkalmazása esetén mint tartószerkezet működik a bevonat kötéséig, kötés után pedig mint erősítő tartóelem.

A kötött szénszál a hő- és lángvédelmi eszközök alapanyaga, és a CFRC kompozit alapanyaga.

Oxidált szál

Az oxidált szál a PAN-szál hőstabilizációjából származik.

A PAN-fonal oxidált szálból keresztcsévélt kivitelben készülő többágú fonal; (a termék neve a Zoltek cégnél Pyron). Ez a fonal vegyileg ellenálló, termikusan stabil és alkalmas különböző célból felhasználható

textilipari termék készítésére.

Az oxidált szál széntartalma 62%, fajsúlya 1.35 g/cm³.

A kötött oxidált PAN-kelme vegyileg ellenálló, termikusan stabil, ezért több célra is használható, például hőálló (tűzálló) munkavédelmi eszközök készítésére.

A Pyron kötött kelme megtartja az akril jó kezelhetőségi tulajdonságait és emellett még kiváló termikus stabilitást és vegyi ellenállást mutat. Ezért kiválóan alkalmazható magas technikai színvonalú védőkelmeként. A belőle készült bonyolult formák elszéneseíthetőek és így különleges bonyolult formájú szénszál kelme is előállítható.

Az oxidált PAN-szövet még rendelkezik az akril előnyös kezelhetőségi tulajdonságaival, és kiváló termikus stabilitást és vegyi ellenállást mutat. Ezen tulajdonságai alkalmassá teszik magas technikai színvonalú védőszövetként való alkalmazásra. A szövés után elszéneseíthető, így bonyolult formájú kompozit erősítő elemként is alkalmazható.

A leírtak bizonyítják, hogy a szénszál valóban a XXI. század, a kompozitok korának meghatározó szerkezeti anyaga.

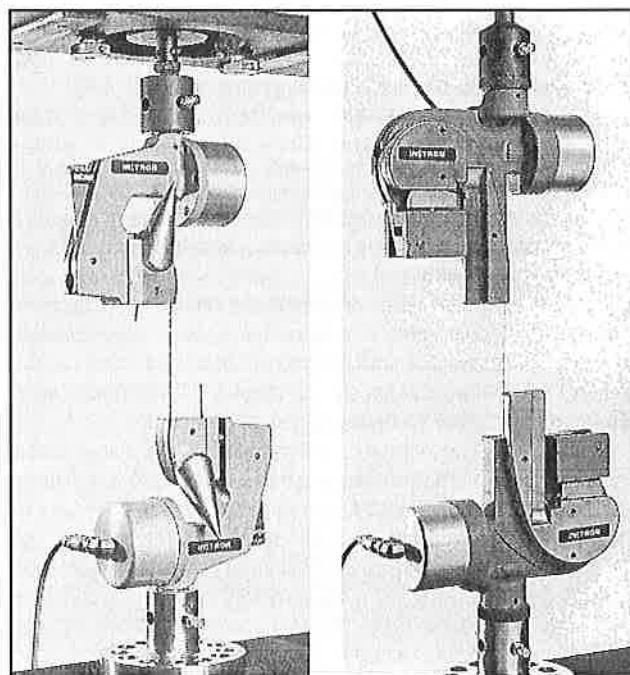
A Zoltek Magyar Viscosa Rt. által gyártott szénszál-termékek márkanéve: PANEX. A PANEX33 szénszál főbb fizikai tulajdonságai:

Szakítószilárdság:	3600 MPa
Rugalmassági modulusz:	228 GPa
Fajlagos ellenállás:	0.0014 Ω .cm
Sűrűség:	1.78 g/cm ³
Elemi szál átmérő:	7.4 μ m
Széntartalom:	94%

A Zoltek PANEX márkanéven készít 320 ezer elemiszálból álló kábelt (320k), valamint 160k és 48k kábelt, vágott szálat, örlött szálat, különböző fajtájú fonalakat, szöveteket és kötött kelmeket. A szövetek és kötött kelmek az oxidáció után keletkezett preoxból, márkanéven Pyronból, textilipari feldolgozás utáni széneseítéssel (szakaszos széneseítés) készülnek. A Zoltek Magyar Viscosa Rt. kezdetben Panex kábeleket, Pyron fonalakat és szöveteket gyárt, majd folyamatosan megkezdte a teljes termékpaletta gyártását.

Felhasznált irodalom:

- [1] Jean-Baptiste Donnet és Roop Chand Bansal: Carbon fibers
- [2] Andrea Dry: The development of the carbon fiber industry.



Instron befogók a vékony huzalok, textil- és szénszálak vizsgálatához