

Szabó Lóránt⁸⁵²-Szabó Rudolf⁸⁵³: Kompozitok tulajdonságai

Absztrakt: Kompozitok jellemzője a nagy fajlagos szilárdság és merevség, alacsony súly, számos tulajdonságuk szinte minden más szerkezeti anyagét felülmúlja. Lengéscsillapításuk kiváló, kicsi a hőtágulási tényező, fűrésztó igénybevételnek, a korróziónak, a kopásnak, a kedvezőtlen környezeti hatásoknak ellenállnak, így a fenntartási költségek alacsonyabbak. További előnyeik a nagy tervezési rugalmasság, ívelt, aerodinamikai formák készíthetők, bonyolult szerkezetek egy darabból kötőelemek nélkül kialakítva megszilárdíthatók. A növekvő üzemanyag árak és a dinamikai teljesítmény növelése minden mozgó szerkezetnél – kerékpártól az járműveken át a repülőig – a minimális deformációjú szerkezetek – a különböző gépszerkezetek, tartályok, a széllapátok merevítése – különösen a szénszál erősítésű kompozitok kulcsfontosságúak, alkalmazásuk dinamikusan növekvő.

Bevezetés

A szerkezeti anyagok három csoportja; fémek, szervesen nem fémes (kerámiák) és szerves nagy molekulájú polimerek. A gépész mechanikai szemlélet és alkalmazás korábban a fémekre, különösen az acél ötvözetekre fókuszált, amelyek atomi/molekuláris struktúrája izotróp tulajdonságú. A természetben számos különböző anyagból felépülő szerkezeti struktúrára (kompozit) található, például; csont/izom, pókháló, selyemszál, len- kenderszár, stb., amelyek a sokrétű követelményeknek kiválóan megfelelnek. A lényegesen eltérő tulajdonságú anyagok kapcsolódásával különleges anizotróp struktúrák kialakítására nyílik lehetőség. Ma számos különleges követelményű műszaki megoldás esetén az acél- és fémszerkezeteket a nagyobb specifikus szilárdságú és merevségű, számos további előnyös tulajdonságú kompozitok váltják fel. Mindhárom anyagcsoport szál formában és beágyazó mátrixként is használható kompozit (összetett szerkezeti anyag) előállítására (1.táblázat, 1. ábra).

Táblázat 1: Szénszál erősítésű mátrix kompozit fajták évenként gyártott értéke (Milliárd EURO), évenkénti növekedése (%)

	2009	2012	Növekedés, %	2015	2018	Növekedés, %
Szén/Polimer mátrix (CRP)	5,40	6,70	7,5	9,56	13,61	12,5
Szén/Szén mátrix C&C	0,98	1,20	7,0	1,69	2,38	12,0
Szén/Kerámia mátrix	0,73	0,88	6,0	1,20	1,64	11,0
Szén/Fém mátrix	0,65	0,73	4,0	0,93	1,17	8,0
Szén/Hibrid mátrix	0,41	0,50	7,0	0,70	0,99	12,0
Összesen	8,18	10,02	7,0	14,08	19,78	12,0

⁸⁵² Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könyvűipari és Környezetmérnöki Kar, Környezetmérnöki Intézet, szabo.lorant@rkk.uni-obuda.hu

⁸⁵³ ng-tex Bt. Budapest, Magyarország; ingtex@t-online.hu



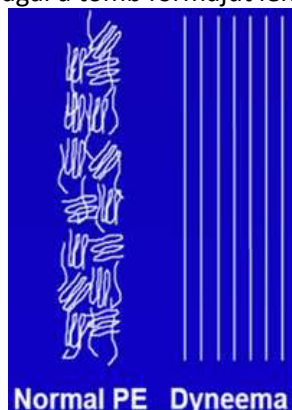
1. ábra: Kompozitok erősítőszálak és mátrix anyagok

Szálak jellemzői

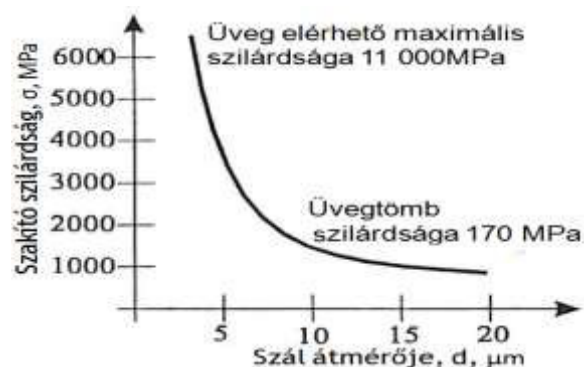
A szálak szerkezetek előnyeit az emberiség korán felismerte, régi időktől elsősorban ruházati célra használta (a vékony szálakból álló textíliák hajlékonyságuk ellenére szilárdak, tartósan használhatók), a szálakból a különböző felhasználásnak legmegfelelőbb textíliák előállítására különböző textiltechnológiákat fejlesztettek ki.

A szál definíciója: a szál átmérőjét (keresztmetszetet) a hosszúság több nagyságrenddel meghaladja. A természetes és a szerves vegyi szálak (regenerált, szintetikus) láncmolekula szerkezetű, a vegyi szálgyártás közben nyújtással a láncmolekulák száltengely irányú rendezésével a szilárdság növelhető (2. ábra).

Az amorf szerkezetű szálak (azbeszt, üveg, bazalt, kerámia, bór) szilárdsága a vékonyítással növekszik, ami a szálak gyártása során előforduló szerkezeti hibák (egyenletesebb lehűlés következtében kevesebb repedés, felületi-, szerkezeti hiba) csökkentéséből adódik. A szálak alakú üveg mechanikai tulajdonságai a tömb formáját lényegesen felülmúlja (3. ábra).



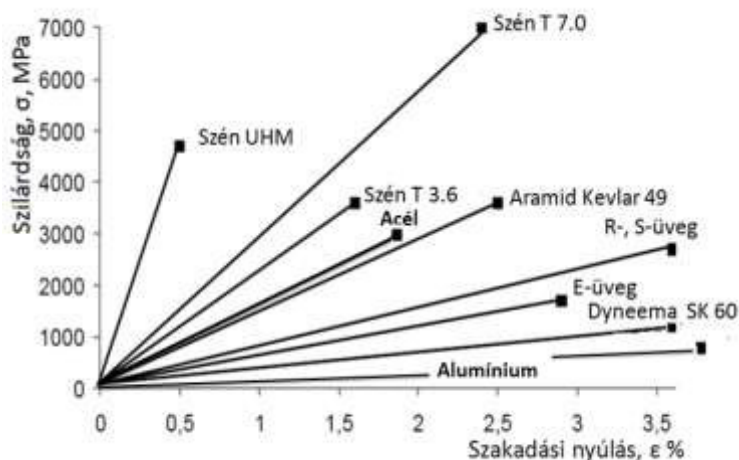
2. ábra: Szálak láncmolekula szerkezetének módosulása



3. ábra: Szálak alakú üveg mechanikai tulajdonságai

A szálak vékonyításával a hajlékonyság, a lágyság, ezáltal a törékenységek csökkenthető, a textiltechnológiai feldolgozhatóság javítható, a szilárdság növelhető.

A szálak - alapanyagtól és gyártástechnológiától függően - erő-nyúlás diagramja jelentősen különböző (4. ábra), amely tulajdonságokhoz és a felhasználási igényeknek megfelelően kell megválasztani és kialakítani a feldolgozási technológiát [4]. A kompozit erősítő, un. nagyteljesítményű szálakat nagy szilárdság, kis nyúlás és nagy húzási modulusz jellemzi.



4. ábra: Különböző anyagok szilárdsági tulajdonságai

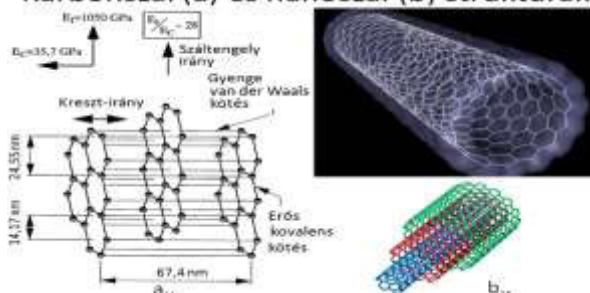
A szén-, az üveg- és az aramid erősítő szálak struktúra jellemzőit az 5. ábra szemlélteti.

Szál	Szerkezet	Jellemzők
Szénszál		<ul style="list-style-type: none"> 2D kovalens kötés Para kristályos (100%) Nagy orientáció
Üvegszál		<ul style="list-style-type: none"> 3D kapcsolódás miatt izotróp tulajdonságú Kovalens kötés a szilícium és oxigén között
Aramid szál		<ul style="list-style-type: none"> 1D kovalens kötés Hidrogén és Van der Waals kötések Para kristályos (100%) Nagyon nagy orientáció

5. ábra: Fontosabb kompozit erősítő szálak szerkezete és jellemzői

A szénszál nagy szilárdsága és húzó merevsége a C-atom aromás tengely irányú molekula szerkezetéből adódik (6. a. ábra). A fajlagosan nagy felületű nano méretű kis szálakat az un. nanoszálakat mátrixba keverve javítja a kompozit tulajdonságait (6.b. ábra). Újabban a 3D nyomtatóval a felületre felvitt atomnyi vastagságú aromás kötésű szénréteg az anyag kopásállóságát és felületi mechanikai szilárdságát jelentősen javítja.

Karbonszál (a) és nanoszál (b) struktúrák



6. ábra: Karbonszál és nanoszál struktúrák

A szénzál jellemző, előnyös tulajdonságai:

Kimagasló specifikus szilárdság és merevség
 Alacsony sűrűség ($\rho=1,7-1,8 \text{ g/cm}^3$)
 Nagy méretstabilitás
 Nagy szívósság
 Kifáradással szemben ellenálló
 Jó rezgécscillapító
 Önkenő
 Alacsony hőtágulási tényező
 Elektromos vezető- és hőstabilitás
 Elektromos vezető
 Röntgensugarat átengedő
 Elektromágnes hatás elleni védelem
 Biológiailag közömbös
 Kémiaiilag közömbös
 Korrozíós hatásoknak ellenálló
 (kiválóan ellenáll a lúgoknak, savaknak és szerves oldószereknek).

A különböző nagyteljesítményű szálak tulajdonságait az 2. táblázat tartalmazza.

Táblázat 2: Különböző nagyteljesítményű szálak tulajdonságai

Megnevezés	C-HT C-Szén High Tenacity	C-IM Interme- diate Modulus	C-HM High Modulus	C-HMS High Modulus Strength	E- Üveg	Alumi- nium	Acel
Sűrűség, ρ , g/cm ³	1,74	1,80	1,83	1,85	2,55	2,70	7,85
Szakadási nyúlás, ϵ , %	1,50	1,93	0,57	0,63	2,5		1,8
Húzó szilárdság, σ , MPa	3600	5600	2300	3600	2470	70- 700	2880
Specifikus húzó szilárdság, σ^* , cN/tex (km)	206	301	125	194	95		36
Húzó rugalmassági modulusz, E, GPa	240	290	400	550	70	70	200
Specifikus húzási rugalmassági modulusz, E*, cN/tex (km)	13800	16100	21850	29730	2700	2600	2500
Hosszú idejű hőállóság, T, °C	500	500	500	500			
Lineáris hőtágulási együttható, α , 10 ⁻⁶ °C	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91	4-9	22,2	13
Szálátmérő, d, μm	7	5	6,5	5	7-13		
Olvadási-/ Szublimációs hőmérséklet, T, °C	3600	3600	3600	3600	840	660	1500

A legnagyobb mennyiségben kompozit erősítésére az üvegszálakat használják. A kompozit erősítő szálak tulajdonsága és ára is nagyban különbözik (3. táblázat).

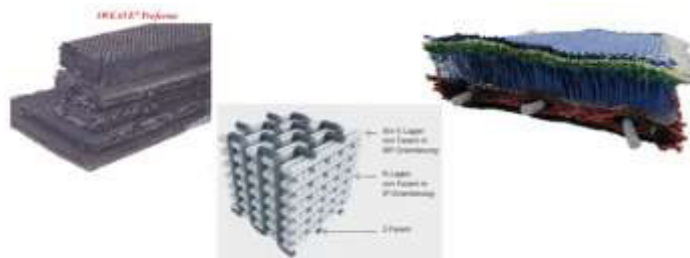
Táblázat 3: Kompozitokhoz használt szálak (filament + aprított, 2010)

Szálak	Mennyiség, kt	€/kg	Repülőgép/Úrk., %
E – üvegszál*	3 450 (98%)	1,2	12 Egyéb
Speciális üvegszálak, S, R	40	8,5	21 Üveg
Szénzál	31 (2%)	25-35	45 Szénzál
Aramid szál	3	20-25	21 Aramid szál
Összesen	3524	100%	100%

* Filament, Roving, Aprított (Rövid vágott szál nélkül a fröncsöntéshez)

A különleges igények kielégítésére a legsokoldalúbban a szénzál erősítésű kompozitokat alkalmazzák (~15%-os évenkénti növekedés). Az aramid szál erősítésű kompozitok ütészilárdsága kiemelkedő, de nyomó szilárdsága csekély.

A nagyteljesítményű vékony szálakból felépített textil szerkezetek nagy előnye, hogy a kis átmérőjű, nagy szilárdságú és nagy húzási merevségű szálakból készített textil szerkezet hajlékony, az ismert textiltechnológiákat továbbfejlesztve bonyolult, 3D alakú, nagyméretű termékek is előállíthatók [7] (7. ábra).



7. ábra: 3D szövetstruktúrák kialakítása

A műszaki tervezés, a szerkezet-kialakítás területén elengedhetetlen a számszerűsítés, a fajlagosítás, a mechanikai tulajdonságok értékének pontos, jellemző megadása.

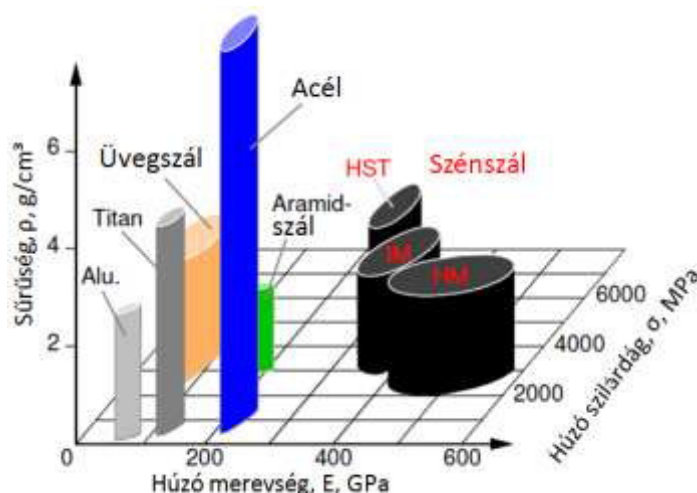
A mérnöki gyakorlatban korábban a szilárdságot kizárólagosan a szerkezet keresztmetszetére vonatkoztatva adták meg:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[Pa \rightarrow \frac{kg}{ms^2} \right].$$

Az angolszász mértékrendszerben a felületre vonatkoztatott szilárdságot (KSI \rightarrow Kilo Square Inch \rightarrow négyzet inch-re ható erő pounds-ban) adják meg.

Átszámolás: (1 MPa \approx 145 KSI).

A keresztmetszetre vonatkoztatott szilárdság azonban az anyagok sűrűségét figyelmen kívül hagyja, jóllehet az újabban kifejlesztett szerkezeti anyagok sűrűsége közel nagyságrenddel eltérő is lehet (8. ábra).



8. ábra: Erősítő szálak és fémek mechanikai tulajdonságai

A szilárdságot emiatt az anyag súlyára (tömegére) vonatkoztatott ún. specifikus szilárdsággal (σ^*) – a fajsúllyal (néhány esetben a sűrűséggel) elosztva – kifejezőbb megadni [4]:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\rho g} \quad [km].$$

A specifikus szilárdság (σ^* [km]) és a keresztmetszetre vonatkoztatott szilárdság (σ [Pa]) közötti kapcsolat:

$$\sigma^* = 10^{-6} \sigma / \rho g \quad [km],$$

ahol:

ρ – az anyag sűrűsége [kg/m³],

g – gravitáció 10 [m/s²].

A súlyra vonatkoztatott specifikus szilárdság mértékegysége a SI-rendszerben a hosszúság, amit km-ben célszerű megadni. A specifikus szilárdságnak szemléletes értelmezése; egyenletes, azonos keresztmetszetű anyag milyen magasra emelhető, amíg a saját súlyából

adódó terhelés hatására eléri a szakító szilárdságát (9. ábra).

A fonal/szál finomsága tex (1000m fonal tömege g-ban) helyett a tex* (1000 m fonal súlya cN-ban) is értelmezhető.

Textiles rendszerben a specifikus szilárdság értelmezése a fonal szakítóerő (F [cN]) és fonalfinomság (tex* [cN/1000m]) ismeretében:

$$\sigma^* = F / \text{tex}^* \quad [\text{cN} // \text{cN/km} \rightarrow \text{km}].$$

Mechanikában az SI-rendszerben értelmezett specifikus szilárdság [km] és a textiliparban használatos specifikus szilárdság (cN/tex*) mérőszáma megegyezik (1 km = 1 cN/tex*), mindkettő használható.

Angolszász rendszerben a textiles specifikus szilárdságot (gpd – gf/den – gramm (erő) per denier) (denier – 9000 m anyag tömege (súlya gramm erőben)) adják meg.

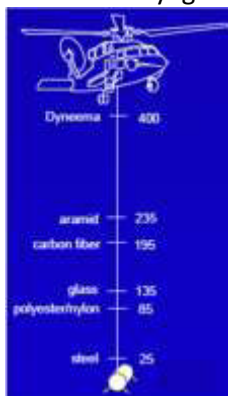
Átszámolás: 1 gpd \rightarrow 1 g/den* = 0,09 km \rightarrow 0,09 cN/ tex* = 0,9 cN/dtex*,

$$1 \text{ km} \rightarrow 1 \text{ cN/tex}^* = 0,1 \text{ cN/dtex}^* = 0,11 \text{ gpd}.$$

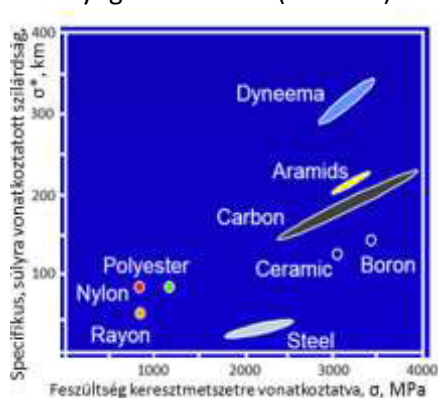
Különböző tanulmányokban a tömegre vonatkoztatott specifikus szilárdságl (σ^{**}) és specifikus húzási merevség is előfordul:

$$\sigma^{**} = \sigma / \rho \quad [\text{m}^2/\text{s}^2].$$

A szerkezeti anyagok mérnöki gyakorlatban használt szilárdságát (σ) és a specifikus szilárdságát (σ^*) összehasonlítva az anyagok sűrűség-különbsége miatt lényeges az eltérés (10. ábra).



9. ábra: Specifikus, súlyra vonatkoztatott szilárdság (szakító hossz) értelmezése



10. ábra: Különböző szálak keresztmetszetre és súlyra vonatkoztatott (pecifikus) szilárdsága

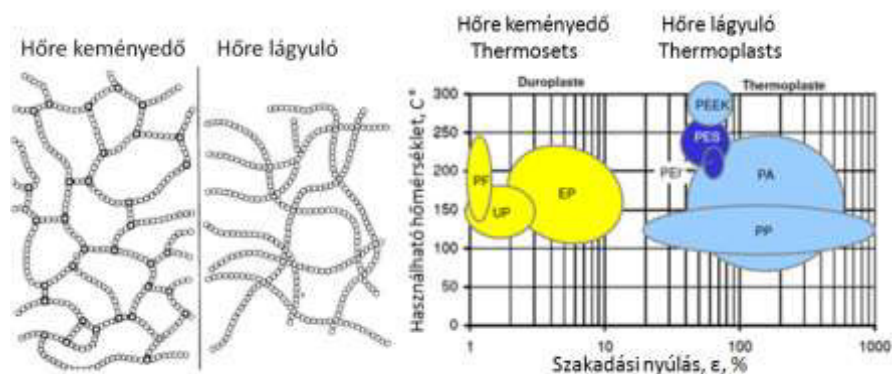
A keresztmetszetre vonatkoztatott húzó rugalmassági moduluszt általában (E) GPa-ban, ill. angolszász rendszerben MSI (**M**ega **S**quare **I**nch) adják meg.

A szilárdsághoz analóg módon definiálható a specifikus húzási rugalmassági modulusz [E^*] is:

$$E^* = \frac{E}{\rho g} \quad [km].$$

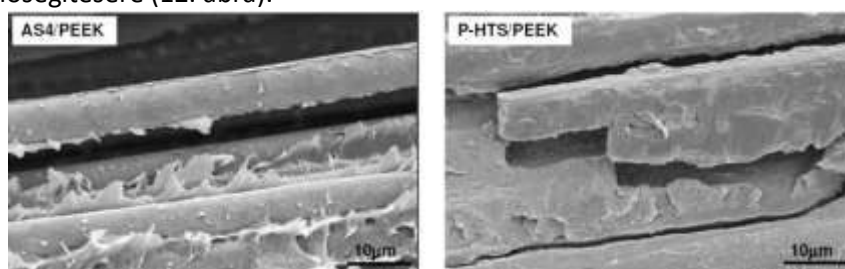
Polimer mátrixok

A hőre keményedő polimer láncmolekulái a tér minden irányába egymással kapcsolódnak, míg a hőre lágyulóké vonalas kialakítású (11. ábra).



11. ábra: Hőre keményedő és hőre lágyuló mátrix anyagok nyúlás hőállósági tulajdonságai

A szálak felületét aktiválják, a szál felületére avivázs (sizing) anyagot visznek fel a mátrixszal a jobb kémiai kötés elősegítésére (12. ábra).



12. ábra: Szál-mátrix adhézió

A szál, a kábel, a textil kelme (preform) mátrix-val átítatására számos eljárást dolgoztak ki. A kelme közötti légzárványok kiküszöbölését vákuummal vagy túlnyomással és a mátrix viszkozitás növelésével – a szál és a mátrix hőállóságától függően – lehetőség szerint magas hőmérsékleten valósítják meg a mátrix textília/szálak közé való behatolását.

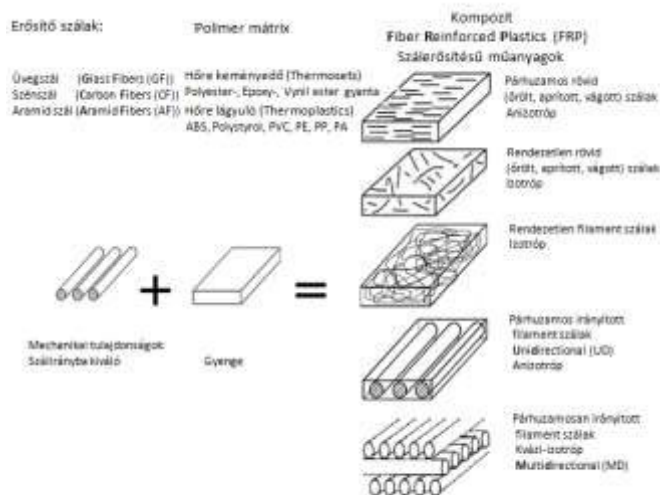
Kompozitok jellemzői

A kompozit lényegesen eltérő tulajdonságú anyagokból – az erősítő szálból és a beágyazó, összekötő, kikeményedő mátrix anyagból – létrehozott új anyag, amely mechanikai tulajdonságai az igényeknek megfelelően tág határok között tervezhető. A kompozitok számos előnyös tulajdonsága az erősítő szálak és a mátrix anyagok összegezéséből nem vezethető le. A kompozitok fontosabb tulajdonságait meghatározó paraméterek (13. ábra):



13. ábra: Erősítő szálak és fémek mechanikai tulajdonságai

A szálakat, a végtermékeknek megfelelően kialakított textíliákat mátrixba ágyazva és kikeményítve bonyolult, különleges igényű, kiváló mechanikai tulajdonságú szerkezetek gazdaságos kialakítását teszik lehetővé. A kompozitok sokféle szál/mátrix kombinációval készíthetők (14. ábra).



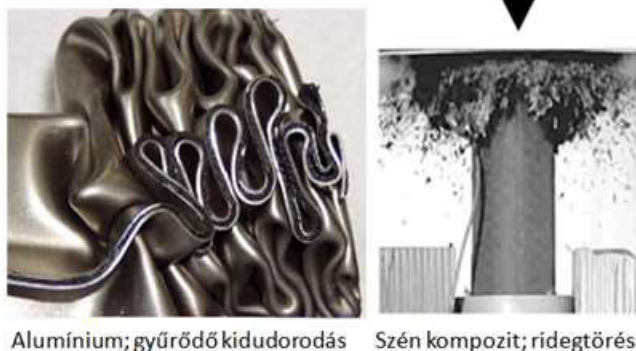
14. ábra: Szálerősítésű műanyagok (FRP → kompozitok) sajátosságai

Az irányított szálszerkezetű kompozitok a mechanikai igénybevételnek megfelelően (anizotróp) készíthetők. A szálak irányától függően lehetnek UD – Uni Directionals, BD – Bi Directionals, MD – Multi Directionals és síkbeli (2D) valamint térbeli (3D).

A kompozitok mechanika jellemzői lényegesen túlszárnyalják a fémek tulajdonságait - különösen a szénszál erősítésűek – számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek.

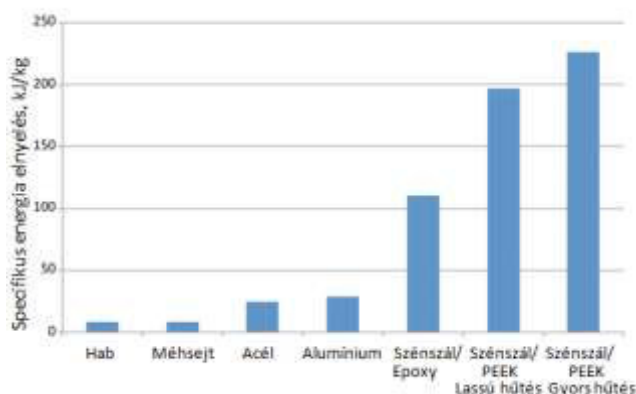
A kompozitok energiaelnyelő tulajdonsága kiváló. Amíg a fémek ütközés, túlterhelés hatására kihajlanak, addig a kompozitok ridegtörése számottevően jobb energiaelnyelő (15. ábra).

Energiaelnyelés ütközési tönkremenetel



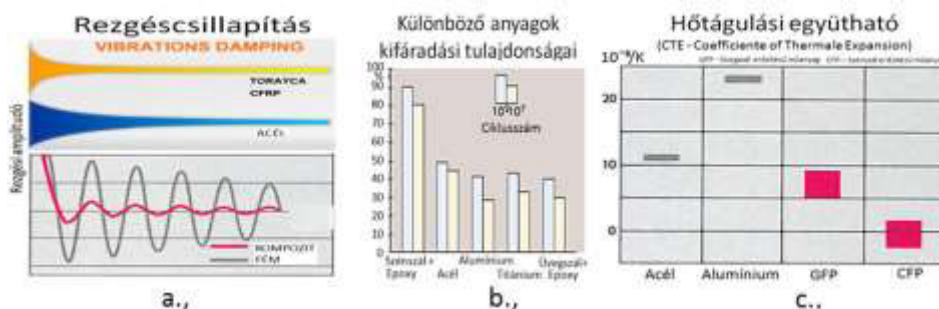
15. ábra: Kompozitok ridegtörése

A különböző szerkezeti anyagok tömegre vonatkoztatott energiaelnyelését a 16. ábra szemlélteti.



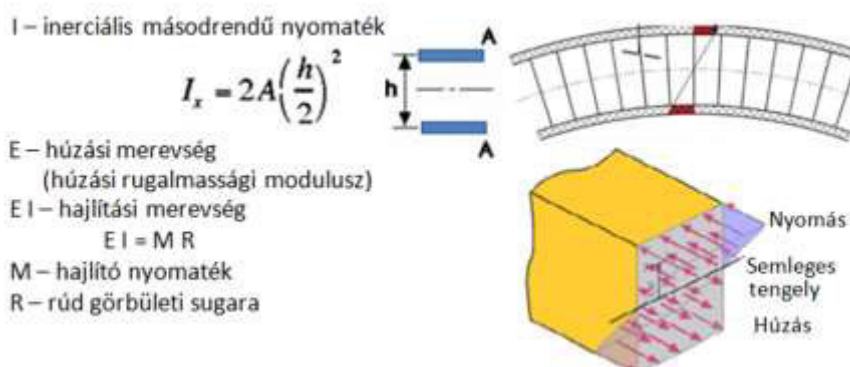
16. ábra: Különböző szerkezeti anyagok specifikus energia elnyelése

Különböző szénszál erősítő kompozit alkalmazásával 1 kg acéllal elérhető húzási merevséghez és húzási terheléshez viszonyítva ugyanazon funkció a tömeg jelentős csökkentésével érhető el. A kompozitok rezgéscsillapítása a fémeknél számottevően kedvezőbb (17. a. ábra), a fárasztó hatásoknak jól ellenállnak (17. b. ábra), hőtágulási együtthatójuk alacsony (17. c. ábra).



17. ábra: Szerkezeti anyagok tulajdonságai

A könnyű maganyagok használatával (aramid-, alumínium méhsejt, habanyag, balza fa) könnyű, nagy hajlítási merevségű kompozit szerkezetek készíthetők (18. ábra).



18. ábra: Nagy hajlítási merevségű kompozit szerkezet

Az új, anizotróp, bonyolult alakú, megfelelő méretű, könnyű, nagy hajlítási merevségű szerkezetek az izotróp tulajdonságú, nagy fajsúlyú fémek mechanikai korlátjait számottevően túlszárnyalják. A különböző erősítésű szálak megfelelő arányú alkalmazásával a végtermék a kompozit súlyára vagy árára is optimalizálható [6] (19. ábra).



19. ábra: Különböző erősítésű szálak megfelelő arányú alkalmazása

Jelenleg az alapanyag árak és a kompozit technológiai költségek csökkentésén túlmenően a fejlesztések során nagy erőfeszítéseket tesznek a kompozit gyártási ciklus-idők rövidítésére, a tömeggyártási területeken való alkalmazásra. Közepes szénaszál 28 \$/kg alapárából kiindulva a kész termék árának 78%-át a kompozit gyártási költségek teszi ki. A kompozitok a különleges műszaki követelményű szerkezetekben kulcsfontosságúak, használatuk rohamos növekedése várható (20. ábra).



20. ábra: Különböző szerkezeti anyagok relatív súly- és költségviszonya

A kompozitok főbb alkalmazási területeire a 21. ábra mutat példákat.



21. ábra: Kompozitok főbb alkalmazási területei

Összefoglalás

A különböző műszaki területek fejlesztései, az informatika, a számítástechnika fejlődése gyökeres változást eredményeztek, a berendezések, gépek teljesítményének számottevő növeléséhez járultak hozzá. A különleges igénybevételeknek kitett fémes szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságai azonban számos esetben korlátot jelentenek a teljesítmények további növelésében, ami a könnyű, nagy teljesítményű kompozitok használatát teszi szükségessé.

Referenciák

- [1] J. Todd: History of Composites The Evolution of Lightweight Composite Materials
- [2] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai Műegyetemi Kiadó 2000. 455 p.
- [3] R. Szabó, L. Szabó: New textile technologies, challenges and solutions XXIII Congress of IFATCC, Budapest, 2013. 05. 08-010. 11 p.
- [4] Szabó R., Szabó L.: Könnyűség kulcs a jövőhöz XXIV. Számítástechnika és Oktatás Konferencia – SzámOkt Székelyudvarhely, 2014. okt. 9 - 12.
- [5] H. Timm: Wo liegt der Bedarf für CFK im Automobilbau? Neckarsulm, 24. Juni 2010.
- [6] Szabó L. – Szabó R.: Kompozitok Magyar Textiltechnika 2014/4. p. 2-7.
- [7] A. Schnabel: Stäubli weaving systems for technical textiles FACHTEX Arbeitskreis Technische Textilien Bayreuth, 2014. 10. 01.