

Kompozitok

Szabó Lóránt

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

Szabó Rudolf

Ing-Tex Bt.
ingtex@t-online.hu

Kulcsszavak/Keywords: szénszál, szálerősítésű műanyagok, kompozit
carbon fibre, fibre reinforced plastics, composites

Összefoglalás

A nagy teljesítményű szálak fejlesztésével, valamint a szálak és textiliák mátrixba ágyazásával a felhasználási célra kiváló tulajdonságú ún. kompozitok gyártása válik lehetővé. A szálanyagok ill. a kompozitok sűrűsége számottevően kisebb az acél sűrűségénél, emiatt a szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságainak – a mérnöki gyakorlatban a keresztmetszet helyett az anyag súlyára vonatkoztatott – összehasonlítása a használhatóságot reálisabban mutatja. Az erősítésére használt szálak specifikus szilárdsága és húzási rugalmassági modulusza 10–15-ször nagyobb az acélénál, továbbá nagy hajlítási merevségű, bonyolult, nagyméretű szerkezetek gazdaságos kialakítását teszik lehetővé.

Summary

With development of high-performance fibres as well as with embedding of fibres and fabrics in matrix manufacture of composites with excellent properties becomes possible. The density of fibrous materials and that of the composites is significantly lower than the density of steel; hence comparison of mechanical properties of structural materials is in engineering practice more realistic when they refer to material weight instead of cross section. Specific strength and tensile modulus of fibres used for reinforcing of 10 to 15 times higher than that of steel and the development of high bending rigidity, complex large-scale structures can be produced.

Bevezetés

Az utóbbi évtizedek új szerkezeti anyagai a kompozitok, amelyek a nagyteljesítményű, bonyolult berendezések gyártása terén kulcsfontosságúak. Különösen a szénszál erősítésű kompozitok számos előnyös tulajdonságának köszönhetően számíthatunk gyors ütemű növekedésre, széleskörű használatra.



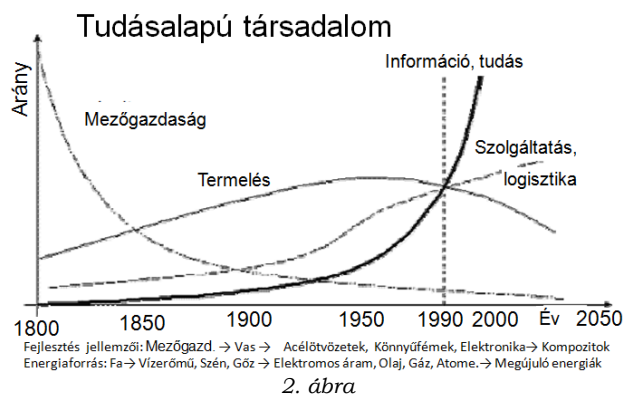
The first composite aircraft fuselage, built for a Spitfire in 1940 by Hexcel's UK site

1. ábra

A természetes anyagú (fa-, len-, kenderszár-) kompozit szerkezet régről használt szerkezeti anyag. Az ember által készített kompozitból Kr. e. 1500 évvel az egyiptomiak a sárba szalmát keverve épületeket készítettek. A mongolok az 1200-as évek elején a fát és a csontot enyvvél összeragasztva, nyírfakéregbe csomagolva, nyomás alatt kompozit nyilakat készítettek. Az így készített íjak rendkívül erősek és nagyon pontosak voltak. Dzsingisz kán katonai dominanciája a kompozit technológiával készített nyilakon alapult, amelyek a legerősebb és legpontosabb fegyverek voltak a puska-por alkalmazásáig.

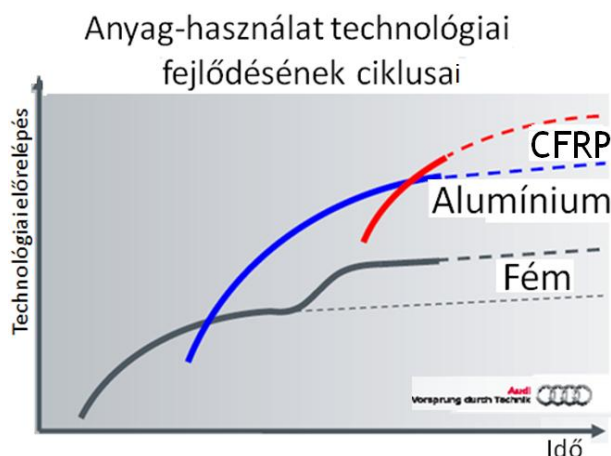
A kompozitok ipari gyártása az USA-ban az 1930-as évek végén az üvegszálak polimerbe ágyazásával és kikeményítésével kezdődött [1] (1. ábra).

A szénszál erősítésű mátrixok alkalmazása az űrkutatás és hadászat területén kezdődött. A szénszál kezdeti magas árának számottevő csökkenése, a kompozit technológia fejlődése és a szénszál erősítésű kompozit kiváló tulajdonságainak köszönhetően mára a sokoldalú alkalmazás, a tömeges felhasználás bevezetése várható. A szénszál erősítésű kompozit az űreszközök, a repülőgépvázak, a hadászati szerkezetek, a sporteszközök, a versenyautók, a nagyméretű szállapátok merevítő szerkezetének és számos további ipari alkalmazás kulcsfontosságú anyaga.



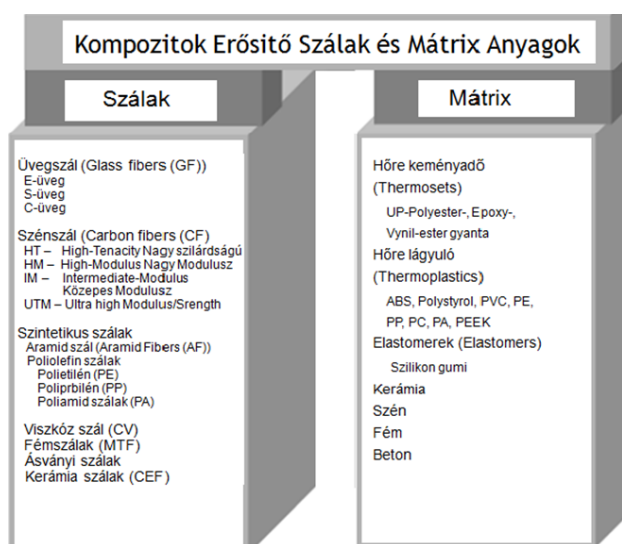
Az elmúlt két évszázadban az életkörülmények, a műszaki fejlesztések területén gyökeres változások következtek be (2. ábra):

- XIX. század: a „szén-, gőz-, vaskorszak” kezdete.
- Közlekedés: hajó, vonat, autó, repülő.
- Energia: szén, elektromos áram, olaj, gáz, megújuló energiák.
- Anyagok: fa, kerámia, vas, acél ötvözetek, könnyűfémek (alumínium, magnézium, titán), műanyagok, kompozitok [6](3. ábra).
- Informatika, logisztika.
- Technológia: új technológiai eljárások, teljesítmények nagymérvű növelése, a gyártott termékek mi-



3. ábra

nőségének javítása, gazdaságosság, fenntartható fejlődés.



4. ábra

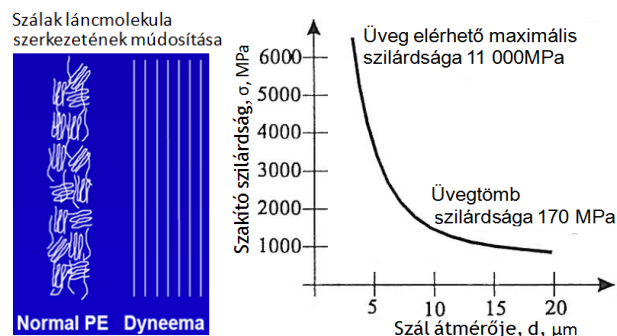
A szerkezeti anyagok (fémek, szervesen nem fémek (kerámiák) és szerves nagy molekulájú polimerek anyagok) három csoportba sorolhatók. Mindhárom anyagcsoport szál formában és beágyazó mátrix-ként is használható kompozit (összetett szerkezeti anyag) előállítására (4. ábra).

A gépész mechanikai szemlélet korábban az acélra, mint kizárólagosan használt korszerű anyagra fókuszált. Ma számos különleges követelményű műszaki megoldásnál az acél- és fémszerkezeti anyagokat a nagyobb specifikus szilárdságú és húzási merevségű, számos további előnyös tulajdonságú kompozitok váltják fel.

A szálak jellemzői

A szál definíciója: az átmérőt, a keresztmetszetet a hosszúság nagyságrendekkel meghaladja. A szálak szerkezet jellemzői: vékonyság, könnyűség, hajlékonyság, lágyág.

A szálak szerkezeteket az emberiség régi idők óta használja. A szálakat kezdetben elsősorban a ruházati igényeknek megfelelően különböző textiltechnológiákat fejlesztették ki.



5/a ábra

5/b ábra

A természetes szálak és a szerves kémiai eljárásokkal előállított szintetikus szálak felépítése egyaránt láncmolekula szerkezetű, amely molekula struktúráját a szálgyártás során a szál tengely irányába rendezve a szilárdsági tulajdonságok javíthatók (5/a ábra).

Az amorf szerkezetű szálak (üveg, bazalt, kerámia) szilárdsága is vékonyítással növelhető, ami a szálak gyártása során előforduló szerkezeti hibák (egyenletesebb lehűlés következtében kevesebb repedés, felületi, szerkezeti hiba) csökkentéséből adódik. Példaként a szálak alakú üveg mechanikai tulajdonságai a tömb formájú lényegesen felülmúlja (5/b ábra).

A szálak vékonyításával a nagy merevségű szálak hajlékonysága növelhető, ezáltal a törékenységi csökkenhet, a textiltechnológiai feldolgozhatóság javítható.

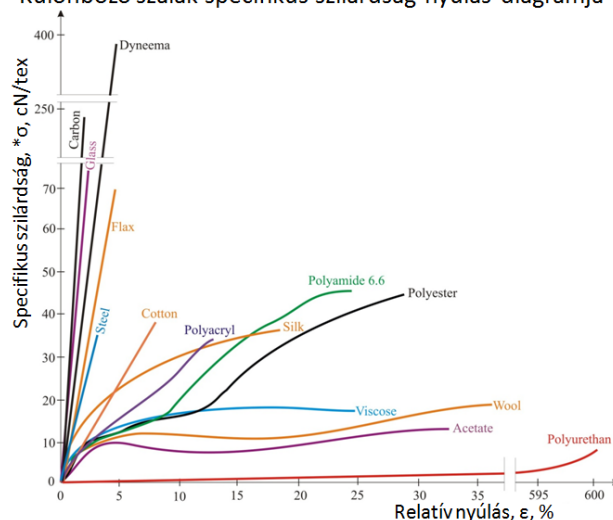
A szálak erő-nyúlás diagramja – alapanyaguktól és a gyártástechnológiától függően – jelentősen különböző (6. ábra), amely tulajdonságokhoz és a felhasználási igényeknek megfelelően kell megválasztani és kialakítani a feldolgozási technológiákat [4].

A kompozit erősítő, ún. nagyteljesítményű szálakat a nagy szilárdság, kis nyúlás és nagy húzási modulus jellemzi (7. ábra).

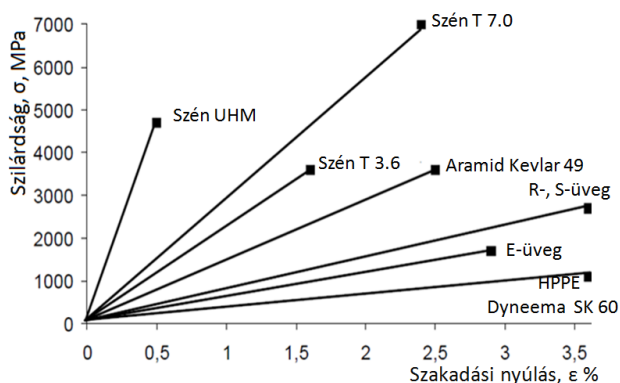
A szén, az üveg és az aramid erősítő szálak struktúra jellemzőit a 8. ábra szemlélteti.

A szénszál nagy szilárdsága és húzó merevsége a C-atom aromás tengely irányú molekula szerkezetének tulajdonítható. A fajlagosan nagy felületű nanométer

Különböző szálak specifikus szilárdság-nyúlás diagramja



6. ábra



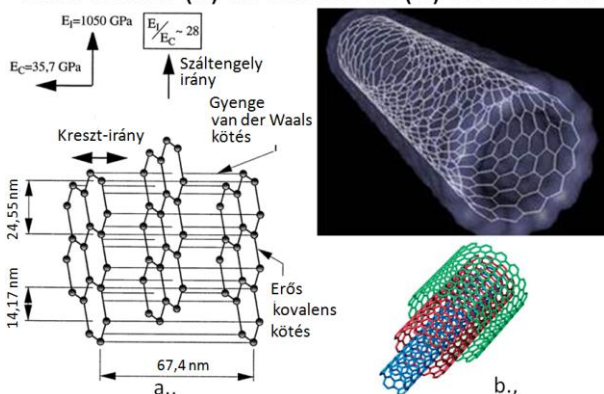
7. ábra

Fontosabb kompozit erősítő szálak szerkezete és jellemzői

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

8. ábra

Karbonszál (a) és nanoszál (b) struktúrák



9. ábra

méretű nagyon vékony szálakat a mátrixba keverve javítja a kompozit tulajdonságait (9. ábra).

A szénszál jellemző, előnyös tulajdonságai:

- kimagasló specifikus szilárdság és merevség,
- kis sűrűség ($\rho=1,7-1,8 \text{ g/cm}^3$),
- nagy méretstabilitás,
- nagy szívósság,
- kifáradással szembeni ellenálló képesség,
- jó rezgéscsillapítás,
- önkenés,
- kis hőtágulási tényező,
- elektromos vezetőképesség
- hőstabilitás,
- átengedi a röntgensugarakat,
- védelem elektromágneses hatások ellen,
- biológiai közömbösség,
- kémiai közömbösség,
- ellenálló képesség korróziós hatásoknak,

1. melléklet Különböző anyagok 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	Acél
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 húzó 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 , $10^{-6}/^\circ\text{C}$	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91	4-9	22,2	13
Szálméret, d, μm	7	5	6,5	5	7-13		
Olvasási-/Szublimációs hőmérséklet, T, °C	3600	3600	3600	3600	840	660	1500

I. táblázat

Kompozithoz 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
Szénszál	31 (2%)	25-35	45 Szénszál
Aramid szál	3	20-25	21 Aramid szál
Összesen	3524	100%	1,58

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

II. táblázat

- kiváló ellenálló képesség savakkal, lúgokkal, szerves oldószerekkel szemben.

A különböző nagyteljesítményű szálak tulajdonságait az I. táblázat tartalmazza.

Kompozit erősítésére a legnagyobb mennyiségben az üvegszálakat használják (II. táblázat). Különleges igények területén a legsokoldalúbban a szénszál erősítésű kompozitokat alkalmazzák (az évi felhasználás kb. 60 ezer tonna) és felhasználása dinamikusan növekvő (meghaladja az évi 10 %-ot). Az aramid szál erősítésű kompozitok ütésállósága kiemelkedő, de nyomási igénybevételi szilárdságuk csekély.

A vékony szálból felépített szerkezet másik nagy előnye, hogy a kis átmérőjű, nagy szilárdságú és nagy húzási merevségű szálak ellenére is a textiltermék hajlékony. Az ismert textiltechnológiákkal bonyolult alakú, nagyméretű termékek állíthatók elő, a könnyű kompozit szerkezet hajlítási merevsége a 3D alakkal érhető el.

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

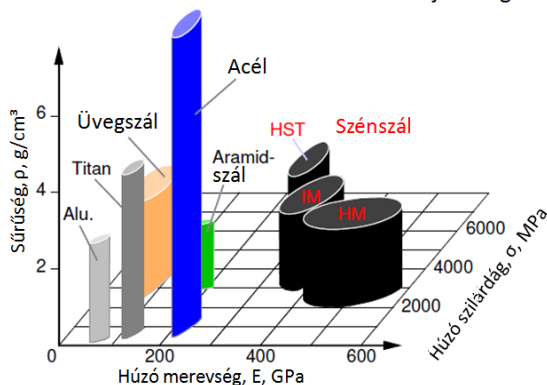
A mérnöki gyakorlatban a szilárdságot a szerkezet keresztmetszetére vonatkoztatják:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[Pa \rightarrow \frac{kg}{ms^2} \right]. \quad (1)$$

Az angolszász mértérendszerben a felületre vonatkoztatott szilárdságot (KSI \rightarrow Kilo Square Inch, azaz 1 négyzet hüvelykre ható erő, fontban) adják meg. Átszámítás: 1 MPa \approx 145 KSI.

A keresztmetszetre vonatkoztatott szilárdság azonban az anyagok sűrűségét figyelmen kívül hagyja, jöllehet a szerkezeti anyagok sűrűsége közel nagyságrenddel is eltérhet (10. ábra).

Erősítő szálak és fémek mechanikai tulajdonságai



10. ábra

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

$$E^* = \frac{E}{\rho g} \quad [m.] \quad (2)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\rho g} \quad [m.] \quad (3)$$

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 [g/cm³],
 g – gravitációs gyorsulás, ≈ 10 [m/s²].

A specifikus szilárdságra a mértékegységek alapján a km adódik. A specifikus szilárdságnak szemléletes értelmezése: egyenletes, azonos keresztmetszetű anyag milyen magasra emelhető, amíg a saját súlyából adódó terhelés hatására eléri a szakító szilárdságát (elszakad) (11. ábra).

A fonál/szál finomsági száma, a tex (1000 m fonál tömege g-ban) helyett a tex* (1000 m fonál súlya cN-ban) is értelmezhető.

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

$$\sigma^* = F / \text{tex}^* \quad [cN / (cN \cdot km^{-1}) \rightarrow km].$$

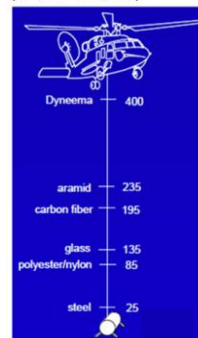
Látható hogy a mechanikában az SI-rendszerben értelmezett specifikus szilárdság és a textiliparban használatos specifikus szilárdság megegyezik ($km = cN / \text{tex}^*$).

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

Átszámítás: $1 \text{ gpd} = 9 \text{ km} \rightarrow cN / \text{tex}^* = 0,9 \text{ cN/dtex}$,

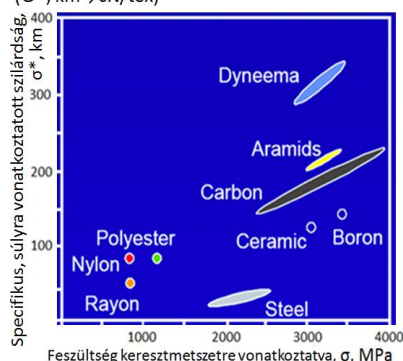
$$1 \text{ km} \rightarrow cN / \text{tex}^* = 0,1 \text{ cN/dtex} = 0,11 \text{ gpd}.$$

Specifikus, súlyra vonatkoztatott szilárdság (szakító hossz) értelmezése (σ^* , km \rightarrow cN/tex)



11. ábra

Különböző szálak keresztmetszetre (σ , Pa) és súlyra vonatkoztatott (specifikus) szilárdsága (σ^* , km \rightarrow cN/tex)

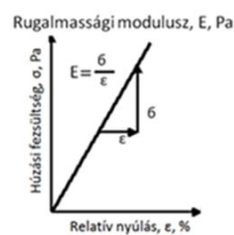


12. ábra

A mérnöki gyakorlatban használt szilárdság (σ) és a specifikus szilárdság (σ^*) alapján a szerkezeti anyagok összehasonlítása lényeges eltérést mutat (12. ábra).

A keresztmetszetre vonatkoztatott húzó rugalmassági moduluszt (E) GPa-ban, ill. golszász rendszerben MSI ga Square Inch) adják meg (13. ábra).

Hasonlóan definiálható a specifikus húzási rugalmassági modulusz is.

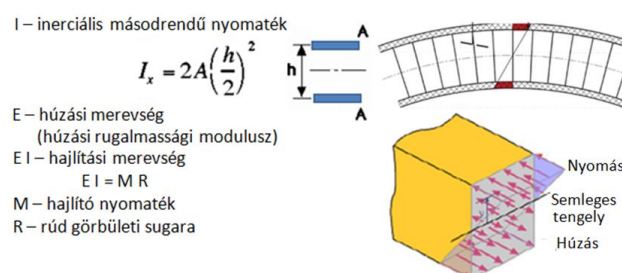


13. ábra

$$E^* = \frac{E}{\rho g} \quad [m.] \quad (4)$$

A könnyű maganyagok használatával (aramid-, alumínium-méhsejt, habanyag, balzafa) könnyű, de nagy hajlítási merevségű kompozitok szerkezetek készíthetők (14. ábra).

Hajlítási merevség (EI)

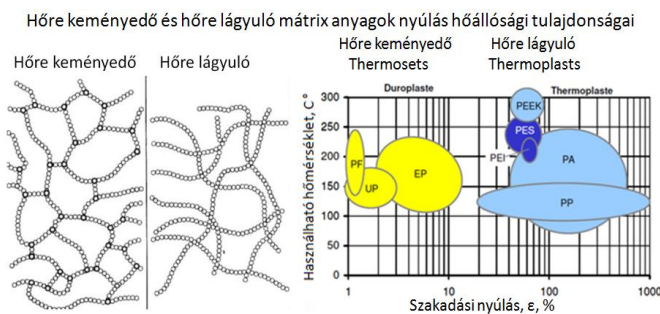


14. ábra

Polimer mátrixok

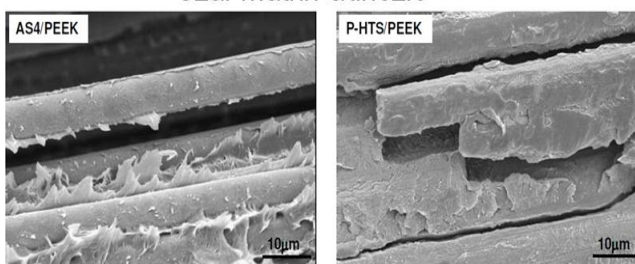
A hőre keményedő polimer láncmolekulái a tér minden irányába egymással kapcsolódnak, míg a hőre lágyuló polimerek láncmolekulái vonalas kialakításúak (15. ábra).

A szál felületét aktiválják, a szál felületére avivázs (sizing) anyagot visznek fel a mátrixszal való jobb kémiai kötés elősegítésére (16. ábra).



15. ábra

Szál-mátrix adhézió



16. ábra

A szál, kábel, textilkelme (*preform*) mátrixszal történő átítatására számos eljárást dolgoztak ki. A kelme közötti légzárványok kiküszöbölését vákuummal vagy túlnyomással és a mátrix viszkozitását növelve – a szál és a mátrix hőállóságától függően – lehetőség szerint magas hőmérsékleten valósítják meg a mátrix infúzióját.

A kompozitok jellemzői

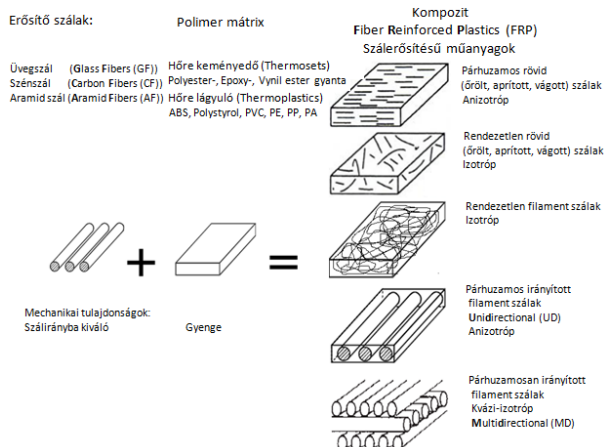
A különböző műszaki területek fejlesztései, az informatika, a számítástechnika fejlődése gyökeres változást eredményeztek, a berendezések, gépek teljesítménye számottevően növekedett. A különleges igénybevételeknek kitett fémes szerkezeti anyagok mechanikai tulajdonságai azonban számos esetben korlátot jelentenek a teljesítmények további növelésében. A kompozitok a különleges műszaki követelményű szerkezetekben kulcsfontosságúak, használatuk rohamos növekedése várható.

A szálakat, a végtermékeknek megfelelően kialakított textiliákat mátrixba ágyazva és kikeményítve bonyolult, különleges igényű, kiváló mechanikai tulajdonságú szerkezetek gazdaságos kialakítását teszik lehetővé. Sokféle szál/mátrix kombinációval készíthetők a kompozitok (17. ábra).

A kompozitok lényegesen eltérő tulajdonságú anyagokból – az erősítő szálból és a beágyazó, összekötő, kikeményedő mátrix anyagból – létrehozott új anyagok, amelyek mechanikai tulajdonságai az igényeknek megfelelően tág határok között tervezhetők. A kompozitok számos előnyös tulajdonsága az erősítő szálak és a mátrix anyagok összegezéséből nem vezethető le (18. ábra).

Különböző szénszál erősítő kompozitok alkalmazása

Szál-erősítésű műanyagok (FRP → kompozitok) sajátosságai



17. ábra



18. ábra

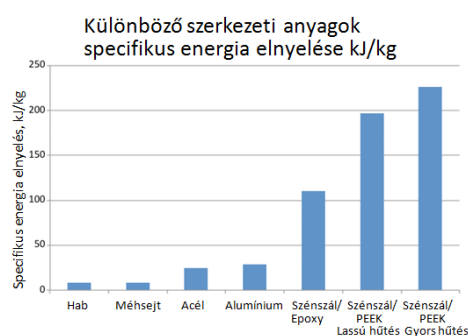
Szénszál erősítésű kompozit acél és alumínium összehasonlító elemzése

- Gépelemet azonos merevségre (húzás) dimenzionálva:
 - Acél ($E=210 \text{ GPa}$, $\rho=7,85 \text{ g/cm}^3$), **1,000 kg**
 - CFRP ($E=230 \text{ GPa}$, $j=45\%$) **0,368 kg** ($E=105 \text{ GPa}$, $\rho=1,45 \text{ g/cm}^3$)
 - CFRP (UHM, $E=600 \text{ GPa}$, $j=60\%$) **0,124 kg** ($E=354 \text{ GPa}$, $\rho=1,64 \text{ g/cm}^3$)
- Gépelemet azonos törési terhelésre (húzás) dimenzionálva:
 - Acél ($R_m=1.400 \text{ MPa}$, $\rho=7,85 \text{ g/cm}^3$), **1,000 kg**
 - CFRP ($R_m=3500 \text{ MPa}$, $j=45\%$) **0,172 kg** ($R_m=1.500 \text{ MPa}$, $\rho=1,45 \text{ g/cm}^3$)
 - CFRP (UTS, $R_m=6400 \text{ MPa}$, $j=60\%$) **0,104 kg** ($R_m=2.800 \text{ MPa}$, $\rho=1,64 \text{ g/cm}^3$)

Tömegre vonatkoztatott energia-elnyelés (kJ/kg) dinamikus igénybevétel esetén:

Nyersanyag	Deformáció jellege	Fajlagos W-elnyelés (kJ/kg)
Acél	Kihajlási tönkremenetel	3
Acél	Gyűrődő kidudorodás	9
Alumínium	Gyűrődő kidudorodás	25
Alumínium (méhsejt)	Méhsejt összetörés	15
Üvegszálak/telítetlen poliszter	Ridegtörés	25-40
Üvegszálak/poliamid 6	Ridegtörés	25-45
Szénszál/epoxigyanta	Ridegtörés	35-80

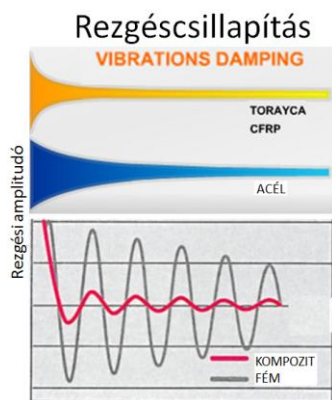
III. táblázat



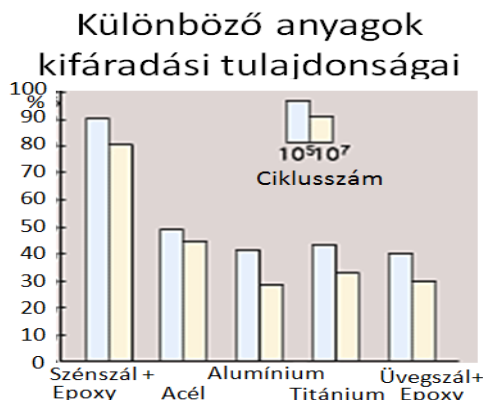
19. ábra

zása esetén az 1 kg acéllal elérhető húzási merevséghez és húzási terheléshez viszonyítva számottevő tömegcsökkentés érhető el (III. táblázat).

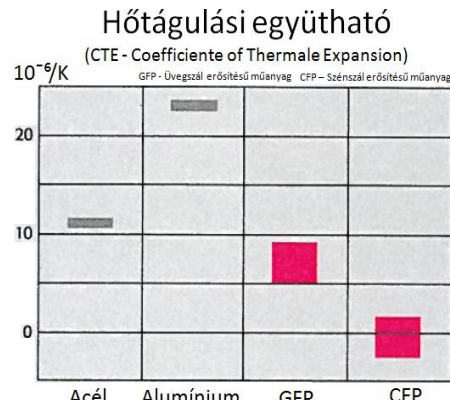
A kompozitok mechanika jellemzői lényegesen túlszárnyalják a fémek tulajdonságait. A kompozitok tömegre vonatkoztatott energiaelnyelését a 19. ábra szemlélteti.



20. ábra



21. ábra



22. ábra

A kompozitok rezgéscsillapítása a fémeknél számottevően kedvezőbb (20. ábra). A kompozitok – különösen a szénszál erősítésűek – a fárasztó hatásoknak jól ellenállnak (21. ábra). Az alacsony hőtágulási együtthatónak köszönhetően a hőmérséklet-változásnak kitett berendezésekben (nyomtatók) kiválóan használhatók (22. ábra).

Új anizotróp, bonyolult kialakítású, megfelelő méretű, nagyon könnyű, nagy hajlítási merevségű szerkezetek előállítására nyílik lehetőség, ezáltal az izotróp tulajdonságú nagy fajsúlyú fémek mechanikai korlátjait számottevően meghaladó nagy teljesítményű berendezések előállítását teszik lehetővé (23. ábra).

A különböző szálerősítésű anyag megfelelő arányú együttes alkalmazásával a késztermék súlyára vagy az árára is optimalizálható (24. ábra).

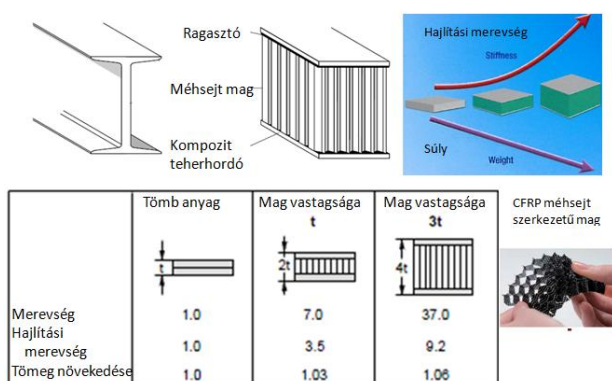
Jelenleg az alapanyagok árának és a kompozit technológiai költségeinek csökkentésén túlmenően a fejlesztések során nagy erőfeszítéseket tesznek a kompozit gyártási ciklus-idők rövidítésére, a tömeggyártás bevezetésére törekednek.

A textiliákhoz a ruházati és lakástextiliákon túl a műszaki és kompozit erősítő textiliák is szervesen kap-

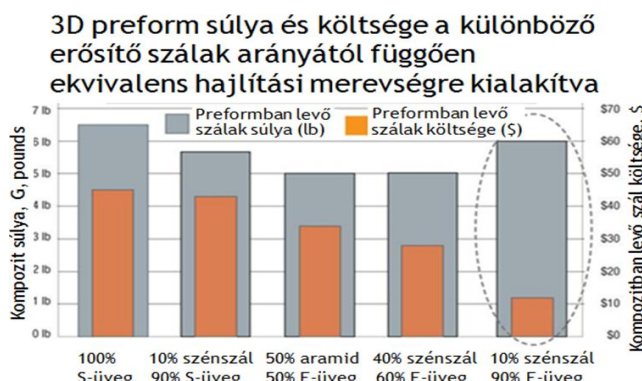
csolódnak, a különböző gyártástechnológiák és felhasználási területek között nem húzható éles határ. A kialakított textiltechnológiák csaknem mindegyike több-kevesebb módosítással alkalmassá tehető ezen sajátos tulajdonságú textiliák gyártására. Kíváncsian várjuk a Techtextil (Frankfurt, 2015. május 4–7.) jövőbe mutató termékeit és az ITMA (Milánó, 2015. november 12–19.) technológiai fejlesztéseit.

Felhasznált irodalom

- [1] Todd Johnson: History of Composites. The Evolution of Lightweight Composite Materials
- [2] Szabó R., Szabó L.: Textilszálak kompozitok megerősítésére. Magyar Textiltechnika 2011/4. p. 177–180.
- [3] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, 2000. 455 p.
- [4] R. Szabó, L. Szabó: New Textile Technologies, Challenges and Solutions. XXIII Congress of IFATCC, Budapest, 2013. 05. 08–10. 11 p.
- [5] Szabó R., Szabó L.: Könnyűség – kulcs a jövőhöz. XXIV. Számítástechnika és Oktatás Konferencia – SzámOkt Székelyudvarhely, 2014. okt. 9–12.
- [6] H. Timm: Wo liegt der Bedarf für CFK im Automobilbau? Neckarsulm, 24. Juni 2010.



23. ábra



24. ábra