

POLIMERTECHNIKA

NGB_AJ050_1

Polimer kompozitok alapanyagai, tulajdonságai, kompozitmechanikai alapok

DR Hargitai Hajnalka

2011.10.19.

- monomer egységekből, makromolekulákból épül fel,
- nagy molekulatömeg, molekulatömeg eloszlás,
- halmaz és fizikai állapot,
- viszkoelasztikus viselkedés (egyidejűleg többfajta deformáció),
- időfüggő tulajdonságok (kúszás, feszültségrelaxáció)
- kis rendezettség, kristályosság
- nagy viszkozitás
- orientáció

Polimer kompozit fogalma

Többfázisú, alkotóiban fázishatárokkal elválasztott összetett szerkezet

- min. 2 komponens: befoglaló mátrix+erősítő anyag
- **a határfelületeken jó tapadás (adhézió), amely a deformáció, igénybevétel magas szintjén is tartósan fennmarad.**

ELV: A **terhelést** a merev, szilárd **szál viseli**, a **mátrix közvetíti** a szálak között

A szálerősítés alkalmazását több hatás is indokolja:

(1) Méret-hatás jelensége

(2) Fajlagos felület növelése a határfelületen: döntő hatású a kompozit tulajdonságaira

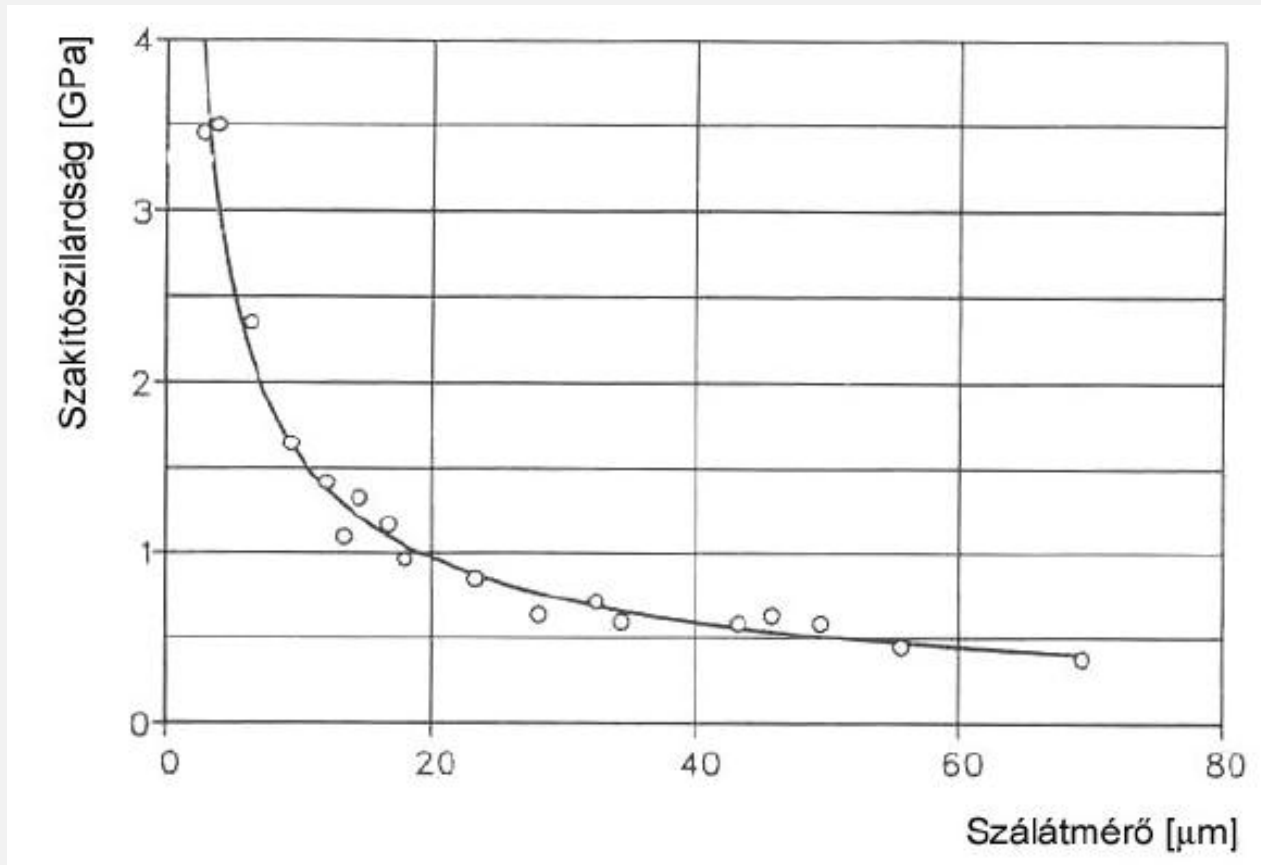
(3) Hajlékonyság: a szálak hajlékonysága nő az átmérő csökkenésével.

Ha a kompozitban lévő **szálak átmérőjét minimalizáljuk**, akkor a hibahelyek előfordulásnak esélye, ezáltal a kompozit tönkremenetelének esélye is lecsökken.

Az erősítő hatás tehát annál nagyobb, minél kisebb a szálatmérő (*mérethatás*).

A szálak szilárdsága ebből adódóan a **10 μ m alatti tartományban** exponenciálisan növekszik, ezzel számottevően növelve az erősítés hatékonyságát.

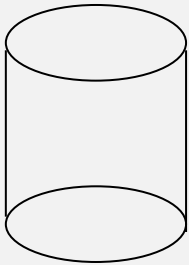
A szálátmérő hatása az üvegszál szakítószilárdságára



Kérdés: Hogyan érhető el a maximális fajlagos szálfelület?

A kompozit tulajdonságait döntő mértékben meghatározza a fázisok érintkező felületének a nagysága, azaz az erősítő anyag fajlagos felülete.

Szál



V: Szál térfogata

A: (fajlagos)felület

L: a szál hossza

R: a szál sugara

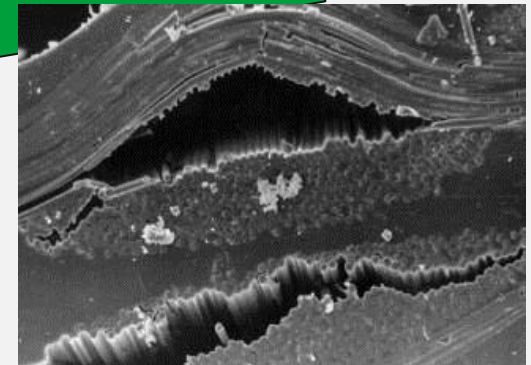
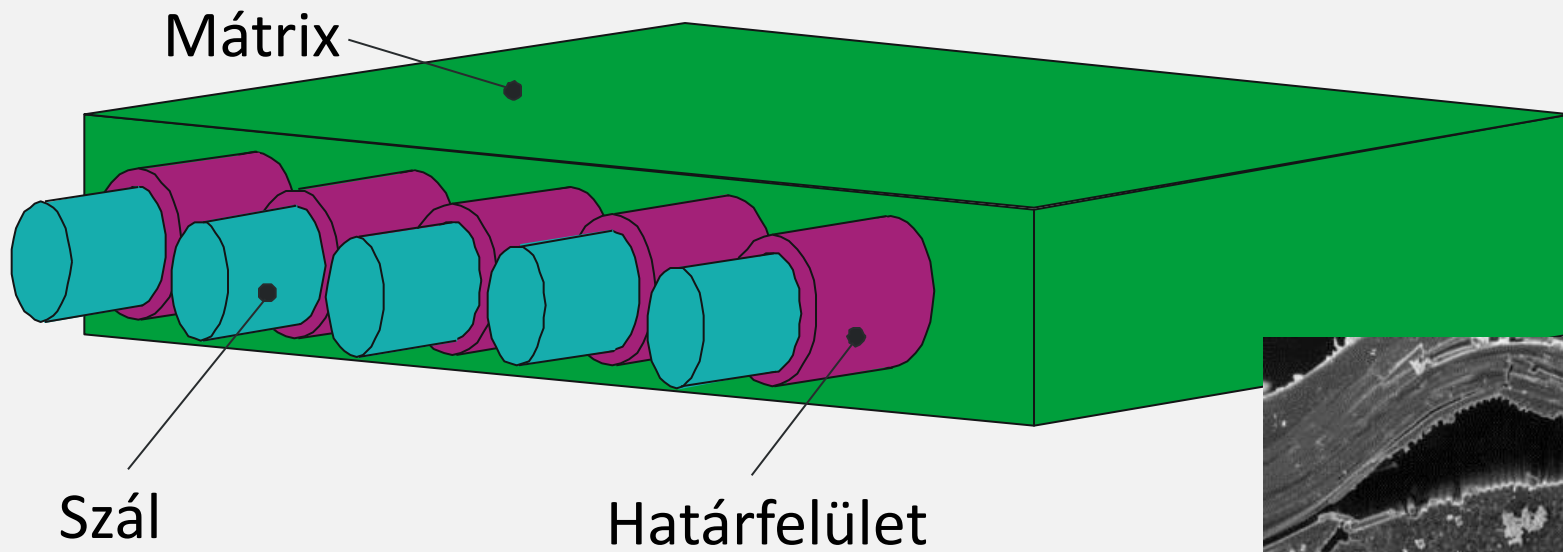
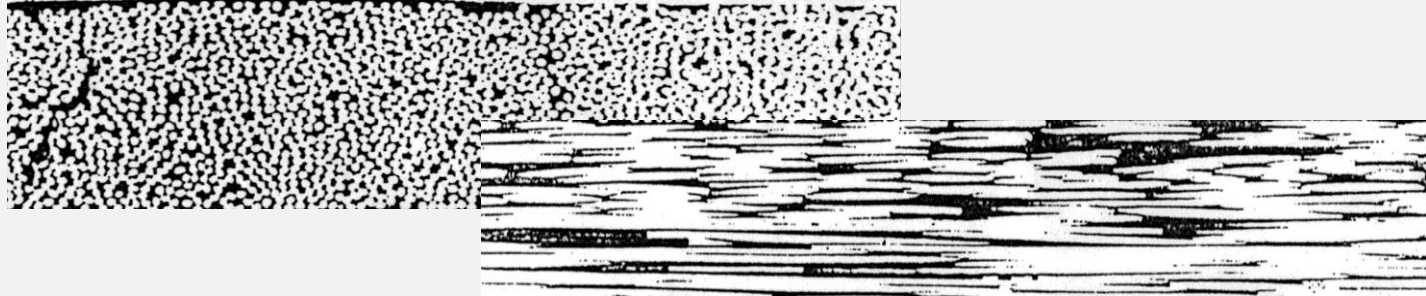
$$\text{Fajlagos felület: } A/V = (2r^2\pi + 2r\pi l) / r^2\pi l = 2/l + 2/r$$

Maximális, ha:

$l \gg r$ minimális átmérőjű hosszú szál (anizotróp, kitüntetett irányú erősítő hatás)

$r \gg l$ vékony lapos korong (pl. lemezes csillám)

(...rövid vágott szálas kompozitokban a szálak l/d viszonyának is kitüntetett jelentősége van...)





erős, lágy kollagén és a kemény, törékeny apatit társítása (fehérjerostok és kalcium-karbonát)

a kemény ligninbe ágyazva erős és rugalmas cellulóz szálak,



Hagyományos kompozitok



VÁLYOG: szalma, agyagos sár



ÍJ: állati és növényi eredetű anyagok kompozitja
magyarok íja: pl. fából, szürke marha szarvából és állati ínkból,
az egyes rétegeket halenyvvel rögzítették egymáshoz.



VASBETON: megfelelően elhelyezett (feszített vagy feszítetlen) acéli szerkezet, amit "körülöntenek,, betonnal.

1960-as évek: tengerészet,

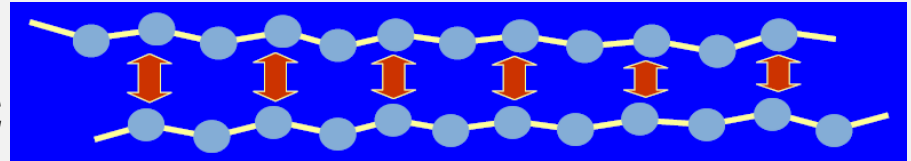
- kiváló mechanikai tulajdonságokkal
- nem mágnesezhetőek, azaz láthatatlanok a radarok számára,
- a különösen korrozív tengeri környezettel szemben ellenállóak.

Alkalmazási területek:

- repülőgépiparban,
- a sporteszközök gyártásánál,
- a közlekedésben,
- az építőipar,
- elektronikai ipar.

- **Hőre lágyuló műanyagok** (gyártás 85-90%-a)

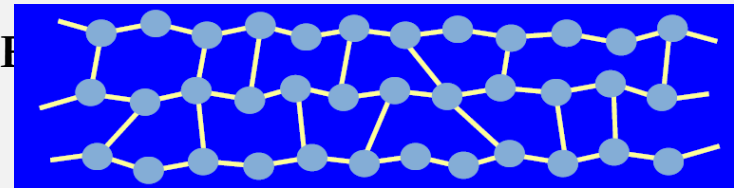
Kristályos: LDPE, HDPE, PP, PA, PET
Amorf: PVC, PS, SAN, ABS, PMMA, PC



Feldolgozásuk képlékeny alakítással

- **Hőre nem lágyuló (térhálós) polimerek** (high-tech alkalmazások)

Ritka térhálós elasztomerek: NR, SR, TPE, PUE
Sűrű térhálós duromerek: PF, UF, MF, UP, EP

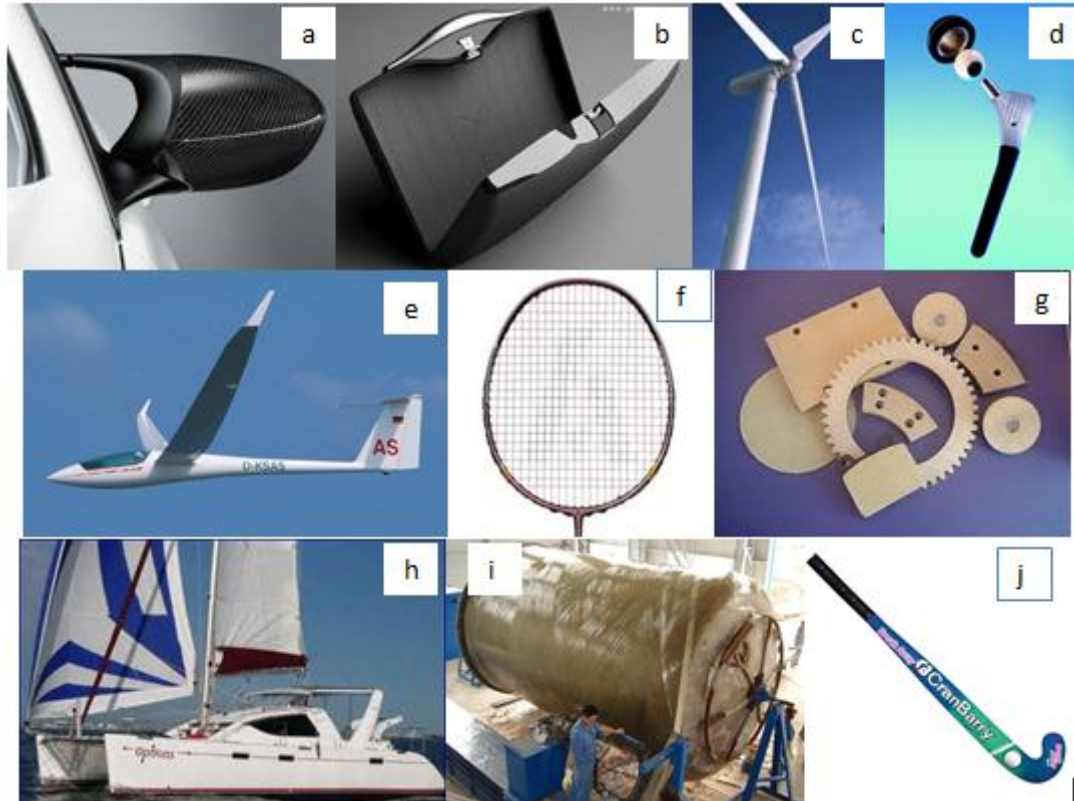


Feldolgozásuk reaktív technológia, a szerszámban, visszafordíthatatlan kémiai reakcióval alakítjuk ki a térhálót.

Polipropilén (PP) és kompozitjai

	PP _{homo}	E-PP _{kopolimer}	PP-farost (35%)	PP- üvegszál(30%)
Előnyök	PE-nél jobb mech. Tul.	PP-nél jobb ütésállóság	Jó merevség, jó hőállóság, gazdaságos	Kitűnő mech. Tul, magas hőállóság
Hátrányok	Korlátozott hidegállóság Korl. ragaszthatóság	PP-nél kisebb modulusz	Korlátozott ütésállóság	Korlátozott hegeszthetőség, gép és szerszámkopás
Alkalmazás	Orientált PP: textilszál, kötöző-pánt, zsákanyag	Rekesz, akku-edény, gépk. Műszerfal, lökhárító, stb.	Gépk. Belső burk., csomagolás-technika	Mosógép alkatrész, gépipari alkatrész

a)-d) szénzál erősítéses polimer kompozitok,



e) szénzál, kevlár, illetve üvegszál mûanyag alkatrészeket is tartalmaz,

f) kevlár erősítéses kompozit
g) súrlódó alkatrészek Kevlar erősítéses mûanyag kompozitból,

h)-j) üvegszál kompozitok

Növényi szálakkal (lenszállal) erősített műanyag kompozit termékek



Hibrid kompozitok

A kompozit alkotói, a befoglaló mátrix vagy az erősítőanyag összetett, több alkotóból áll.



c) kompozit ütő: 20% Kevlar-40%-karbon-40% üvegszál,

a)-b) Karbon/Kevlar szövet és kompozit (polikarbonát),



d) Karbon/kevlar/méhsejtszerkezet

e) Aramid/Bazalt szálak kompozit

hőre nem lágyuló mátrixú anyagok

a térhálós szerkezetet szerszámban, visszafordíthatatlan kémiai reakcióval alakítják ki (reaktív technológia).

High-tech alkalmazások, azaz nagyobb teherbírású szerkezetek is előállíthatók.

A nagyszilárdságú polimer kompozitok legjobb befoglaló mátrix anyagai

- a telítetlen poliészter (UP) és az
- epoxi gyanta (EP).

Ezek az anyagok szobahőmérsékleten folyékony halmazállapotúak és kisebb viszkozitásuk révén jobban impregnálják erősítőszálakat. A hőre nem lágyuló polimer kompozitok tulajdonságait elsősorban az erősítőszál tulajdonságai határozzák meg.

Telítetlen poliészter (UP)

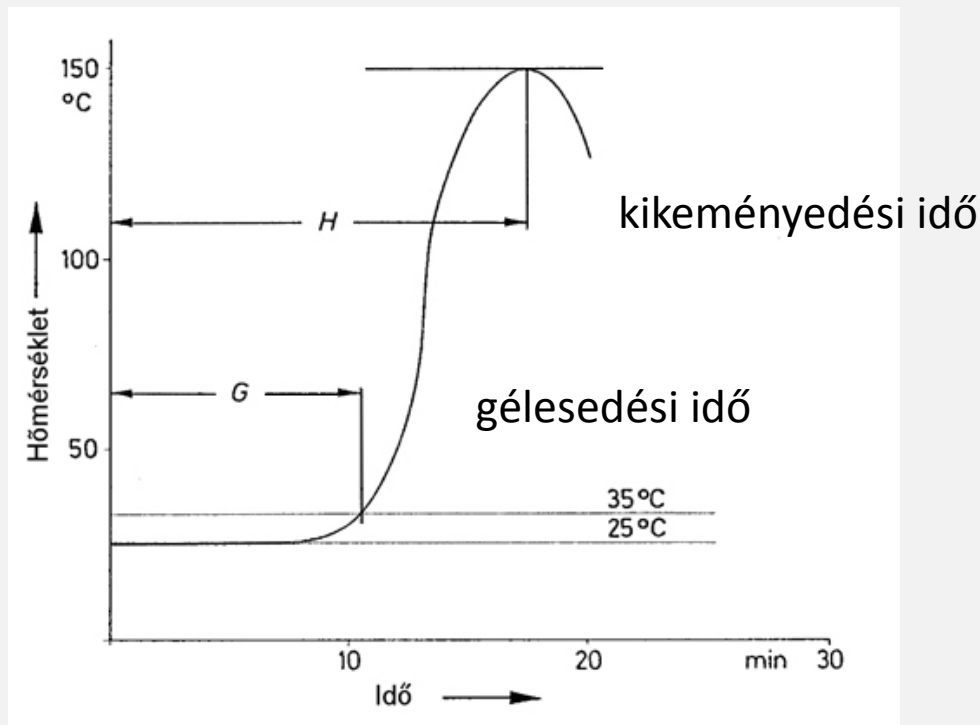
- *alapanyagként*: mézsűrűségű folyékony gyanta: *oligomer* formában (65 % ilyen oligomerből és 35 % vinilmonomerből (tipikusan sztirolból) álló keverék-oldat
- Korlátolt tárolhatóság, a gélesedés magától beindul
- *végtermékként*: térhálós, hőre nem lágyuló nagyszilárdságú műszaki, szerkezeti anyag. (az oligomer gyanta és a monomer kettős kötéseinek elinduló és térhálóhoz vezető polimerizációs *láncreakcióban* keletkezik, legtöbbször üvegszállal,- szövettel,- paplannal erősített *kompozit*)

Telítetlen poliészter

A UP lánreakciója exoterm reakció- jellegű, megfelelő iniciátorral gyors folyamat.

gyanta + gyorsító + katalizátor (iniciátor)

(csak katalizálja a reakciót, nem vesz részt a kémiai folyamatban)



- **Legjobb tulajdonságú gyanta**
- **Oligomer formájában, hasznosítható ragasztóként is, kicsi a zsugorodása, alkalmazása a számítástechnikától az űrtechnikáig sokrétű.**

UP versus epoxi

- Kitűnő mech. Tul.

Előny

- **Hőállóság**
- jó tapadás

Hátrány

- **Zsugorodás (1,5-0,5%)**
- Higiénikus feldolgozást igényel

Alkalmazás

- **Szálerősített kompozit:**
autóipar
vizijárműgyártás
- Szálerősített komp:
Repülőgépgyártás,
elektrotechnika

A polimer kompozitok erősítő anyagai

Természetes szálak



Növényi eredetű
(pamut, len, kender,
farost, kókuszrost, stb.)



Állati eredetű (gyapjú, hernyóselyem, lószőr
stb.)

Ásványi eredetű (azbeszt)

A polimer kompozitok erősítő anyagai

Mesterséges szálak

Szerves

Szervetlen

Aramid (Kevlar)



UHMWPE
(Dyneema)



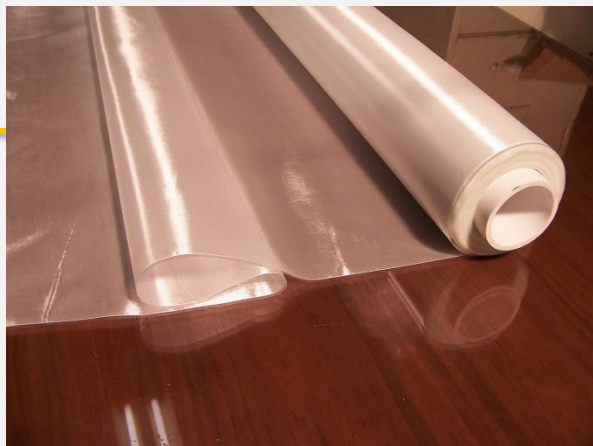
Szilikát (pl. üveg)



Szénszál



Fém, fém-oxid, stb.

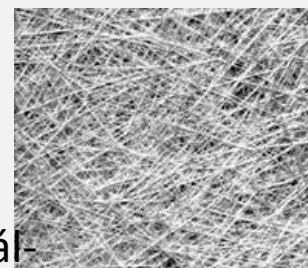


Üvegszál



- Legelterjedtebben alkalmazott erősítőanyag
- Szilikát (55-65% SiO_2 + egyéb fénoxidok)
- $\sim 10\mu\text{m}$ átmérőjű elemi szálak (10^3 db egy kötegben (roving))
- felületkezelés: Írezés (sizing) – védelem a feldolgozás alatt, szál-mátrix tapadás növelése

Epoxi, vinilszilán, fenolgyanta típusú kapcsolószerek)



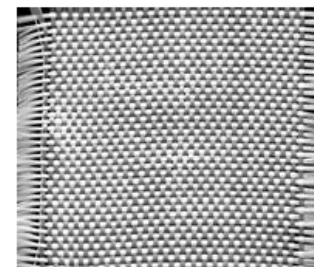
(a)



(b)



(c)

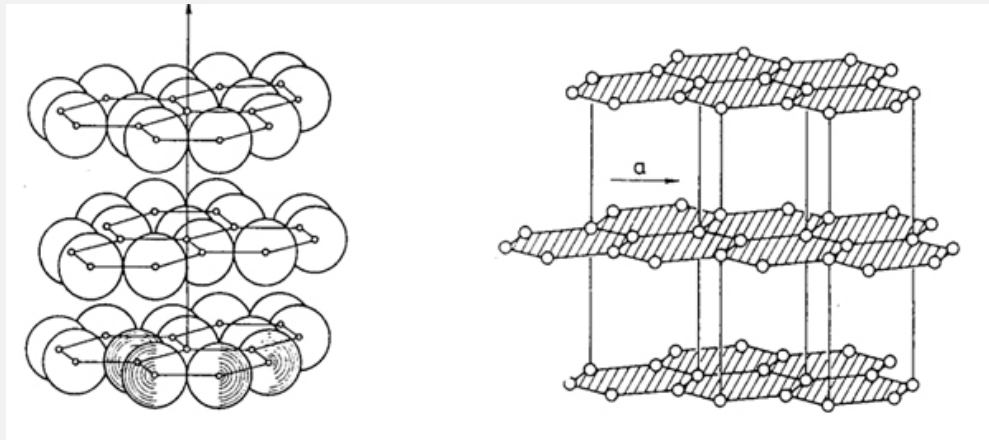


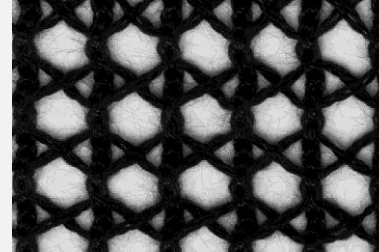
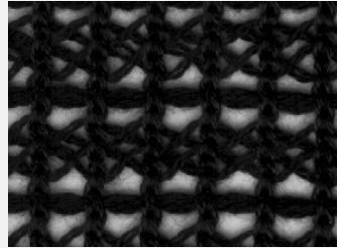
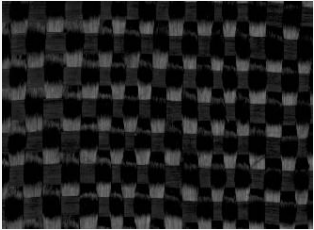
(d)

- **Előnyei:**
 - Olcsó
 - Nagy mennyiségben rendelkezésre áll
 - UV stabil, vegyszerálló, elektromosan szigetel
- **Hátrányai:**
 - erős koptató hatás egyes technológiáknál
 - Viszonylag nagy sűrűség, törékeny
 - alacsony rugalmassági modulus

Szénszál

- Sokféle rendezettségi forma
- Nagy szilárdság a szén-szén kötések miatt
- A szénszálban a grafitos szerkezetet hasznosítjuk
- Rendkívüli grafitszilárdság, nagy modulus





A karbonzálgyártás:

az előtermék (*prekurzor*) *karbonizálása* majd *grafitosítása*, hogy közben ne olvadjon meg, ne égjen el, és a kívánt szénszerkezet alakuljon ki. (a hőfok és idő határozza meg a mech. tul-kat)

Prekurzorok:

- poliakrilnitril (PAN) szál
- kátrányalapú szál
- regenerált cellulóz (műselyem, viszkóz) szál.



1997 óta Magyarországon

Az eljárás főbb lépései:

- 1. stabilizálás:** enyhe oxidáció max. 250 °C-ig, amelyben a szál elszenesedik, de nem olvad meg,
- 2. karbonizáció:** 250–1500 °C-ig történő szenesítés, amelyben a szál 90 %-ban szénké alakul, N₂ (inert) atmoszférában
- 3. grafitosítás:** 1500–2500 °C-on, szigorúan oxigénmentes atmoszférában, feszített állapotban kialakul a gyakorlatilag tiszta szénből álló grafitos szerkezet.

A szénszál alkalmazás

- **Előnyei:**
 - Alacsony sűrűség
 - Magas rugalmassági modulus
 - Magas szilárdsági értékek
 - Alacsony hőtágulási együttható
- **Hátránya:**
 - Rideg
 - Magas ár

- Aromás poliamid, jó szilárdság a nagyfokú orientáció révén, hőállóság
- KEVLAR, TWARON, TECHNORA
- >3000 MPa szakítási szilárdság, $60 \div 120$ GPa húzó modulusz ($\rho=1,44$ g/cm³): a legjobb acélhuzalokkal vetekszenek,
- kompozitja rendkívül szívós, ütésszálló. Ütéssel és nyírással szembeni jó ellenállás (pl. golyóálló mellény)
- gyakran alkalmazzák karbonszállal együtt, *hibrid* erősítőrendszerben.
- A KEVLAR szálak kitűnő szilárdsága igen jól hasznosul a gumikompozitokban pl. a radiál-gumiabroncsokban.
- A NOMEX típusú szálból epoxi vagy fenolgyanta kötőanyaggal papírvékony kompozitlemez különleges kompozitbetét-alkatrészhez (hullámpapírhoz hasonló küllemű, de igen szilárd *méhsejt* lemez (*honeycomb*))

- **Előnyei:**

- Alacsony sűrűség
- Magas szilárdsági értékek
- Jó dinamikai tulajdonságok
- Hajlékony
- lángállóság

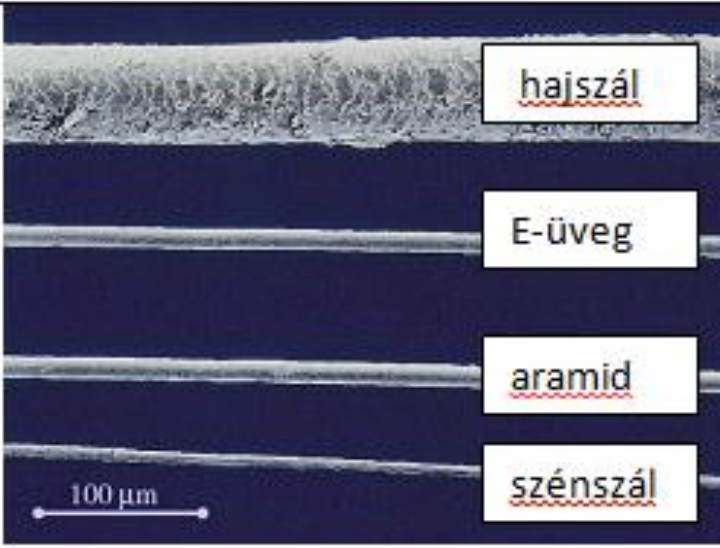
- **Hátrányai:**

- Gyenge ellenállás a környezeti hatásokkal szemben (UV, nedvesség)
- Alacsony nyomószilárdság

Polietilénszál (UHMWPE)

- Gélfázisú szálképzéssel nagymértékű orientáció
- Spectra, Dyneema
- Igen nagy szilárdság, könnyű
- Korlátozott hőállóság (140C), gyenge kompatibilitás más polimerekkel

Jellemző erősítőszálak tulajdonságai

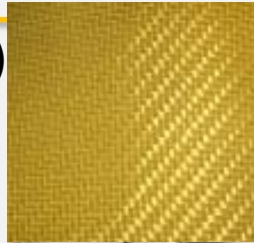
	Sűrűség [g/cm ³]	Rugalmassági modulus [GPa]	Szakító- szilárdság [GPa]	
E-üvegszál	2,5	73	3,5	
Aramidszál	1,45	130	2,7	
Szénszál	1,8	544	2,6	
Polietilénszál (Spectra)	0,97	73-120	2,3-3,6	
Eutektoidos acélhuzal	7,8	240	4,0	



A polimer kompozitok erősítő anyagai

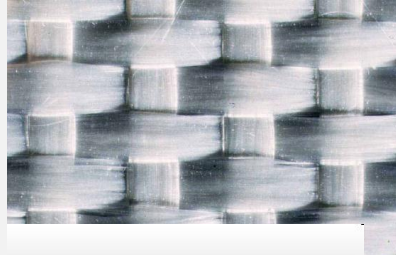
SZE - GYŐR

Aramid (Kevlar)



Mesterséges szálak

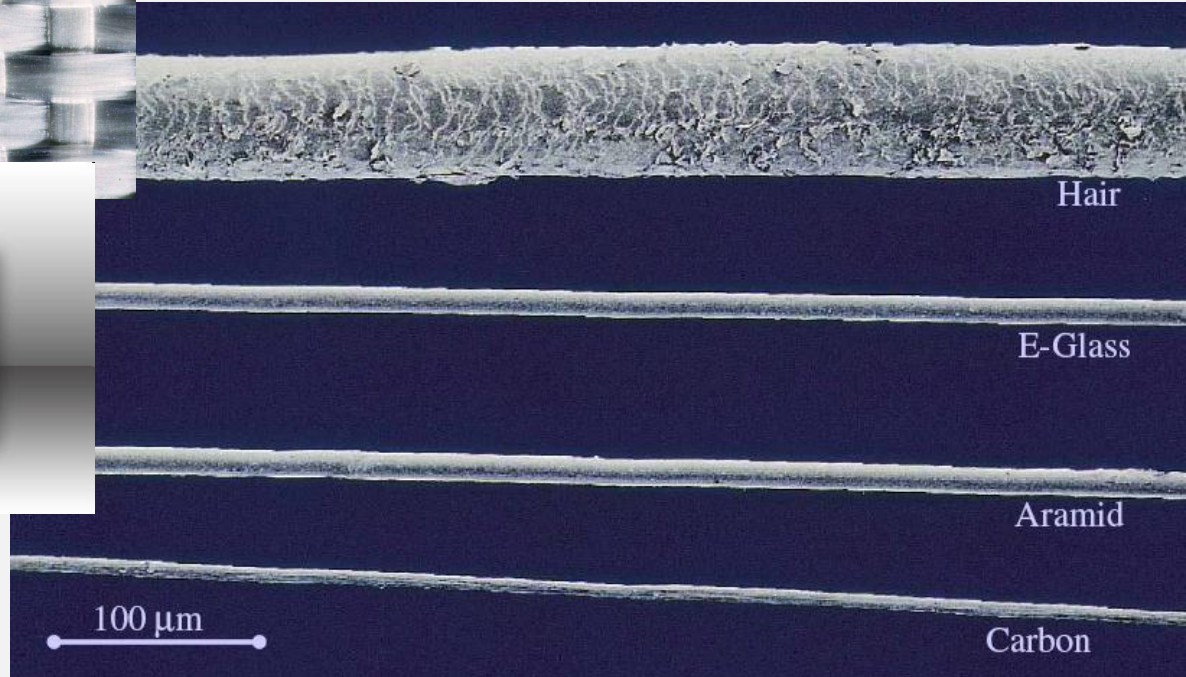
Üvegszál



UHMWPE
(Dyneema)



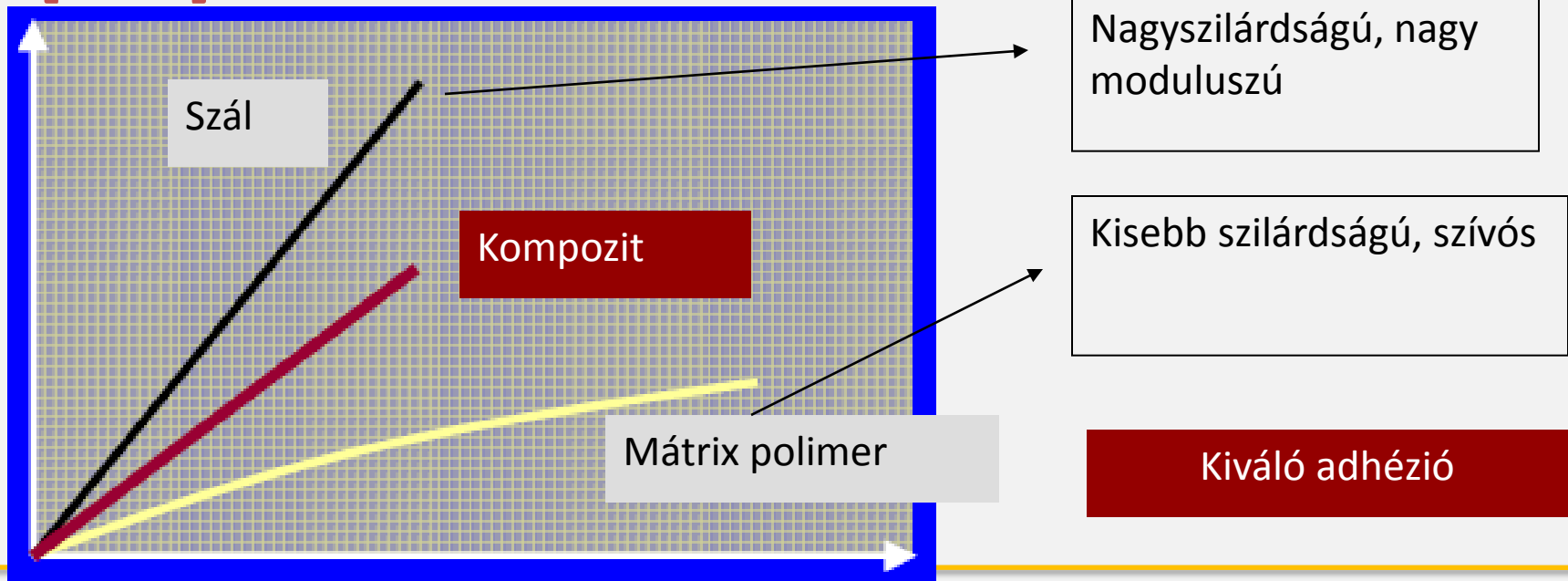
Széniszál



Kompozit

- Többfázisú (összetevői fázishatárokkal elválasztott)
- Összetett szerkezeti anyag, amely
- Erősítőanyagból (tipikusan szálerősítés) és
- Befoglaló anyagból (mátrix) áll

σ [MPa]



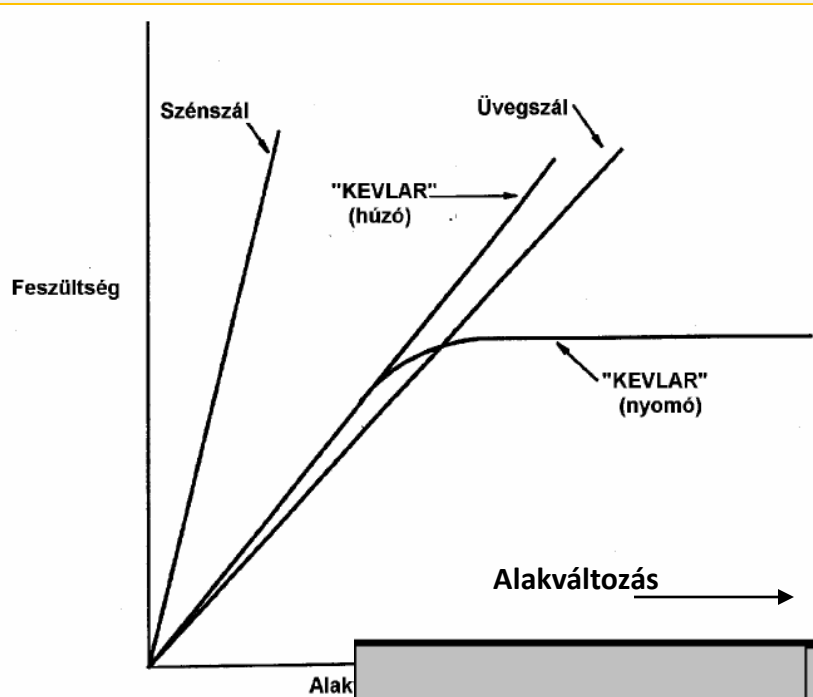
A kompozit tulajdonságainak meghatározói

- A szál-mátrix határfelületi adhézió
- A mátrix mechanikai tulajdonságai
- A szál mechanikai tulajdonságai
- A száltartalom
- A szálhossz, átmérő
- A szálak irányítottsága a mátrixban (orientáció)
- A gyártási technológia

Amátrix polimerek összehasonlítása

polimer	Sűrűség ρ [g/cm ³]	Szakító szilárdság σ [MPa]	Rugalmassági modulus E [GPa]	Szakadási nyúlás ε [%]
LDPE	0,92	10	0,2	400
HDPE	0,95	30	0,9	500
PP	0,9	30	1,6	150
PA6	1,13	80	3,2	50
UP	1,25	50	3,0	2
Epoxi	1,2	50	3,0	3

Az erősítőszálak összehasonlítása



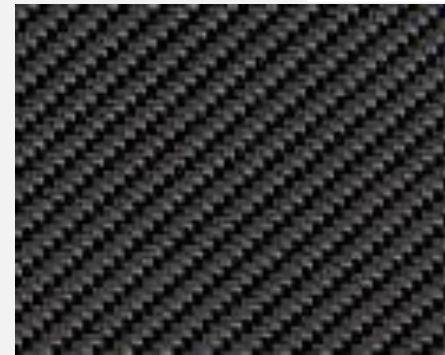
Száltypus	Sűrűség	Szakító szilárdság	Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás
	ρ [g/cm ³]	σ [GPa]	E [GPa]	ϵ [%]
Üvegszál	2,5-2,8	3,2-4,6	70-85	1,8-5,7
Szénszál	1,7-2	2-7	200-700	0,5-1,5
Aramidszál	1,44	2,8-3,8	60-130	2,2-4
Polietilénszál (Spectra)	0,97	2,3-3,6	73-120	2,8-3,9
Acélhuzal	7,6	4	240	1,4

Erősítőszálak kiszerezési formái

- Roving (köteg) vagy szalag (1D)



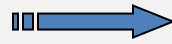
- Szőtt vagy nem-szőtt és kötött textíliák (2D)



- Vastag tűzött kelmék (3D)

Szálak irányítottsága

Szálak irányultsága

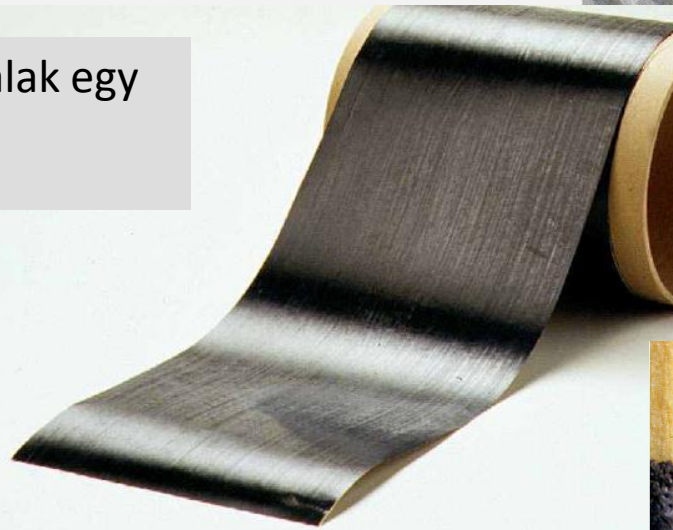


Bizonyos fokú orientáció

Paplan: nincs mechanikailag kitüntetett irány



Unidirekcionális réteg: szálak egy irányban állnak



Szövet: szálak két irányban



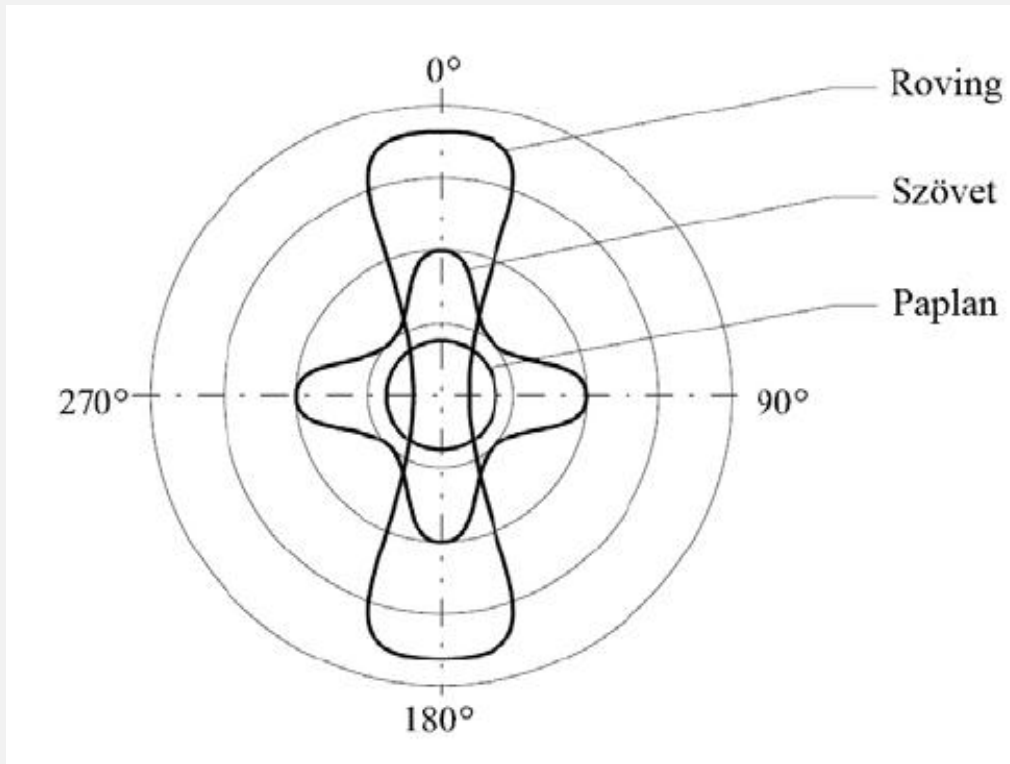
Multidirekcionális réteg: pl. három kitüntetett irány a síkban

Az erősítőanyag kiszerezési formák mechanikai tulajdonságai

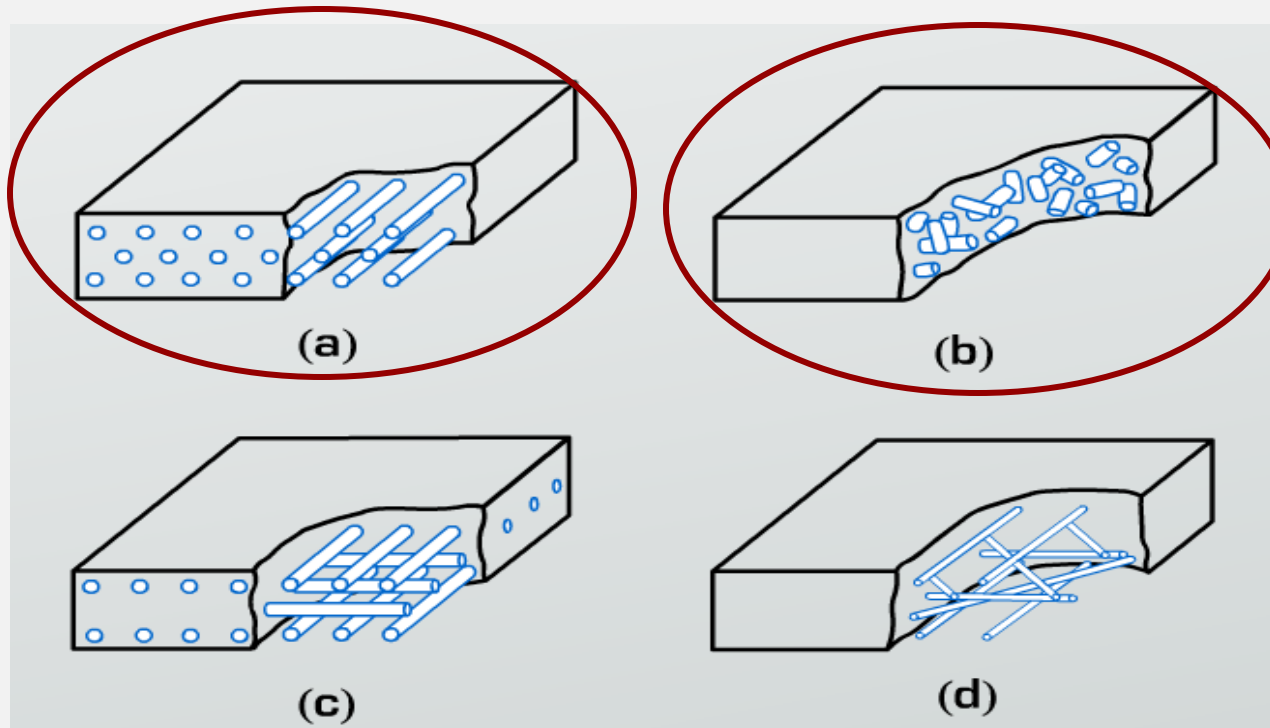
Húzószilárdság és rug. modulusz jellege a terhelési
szög függvényében



POLÁRDIAGRAM



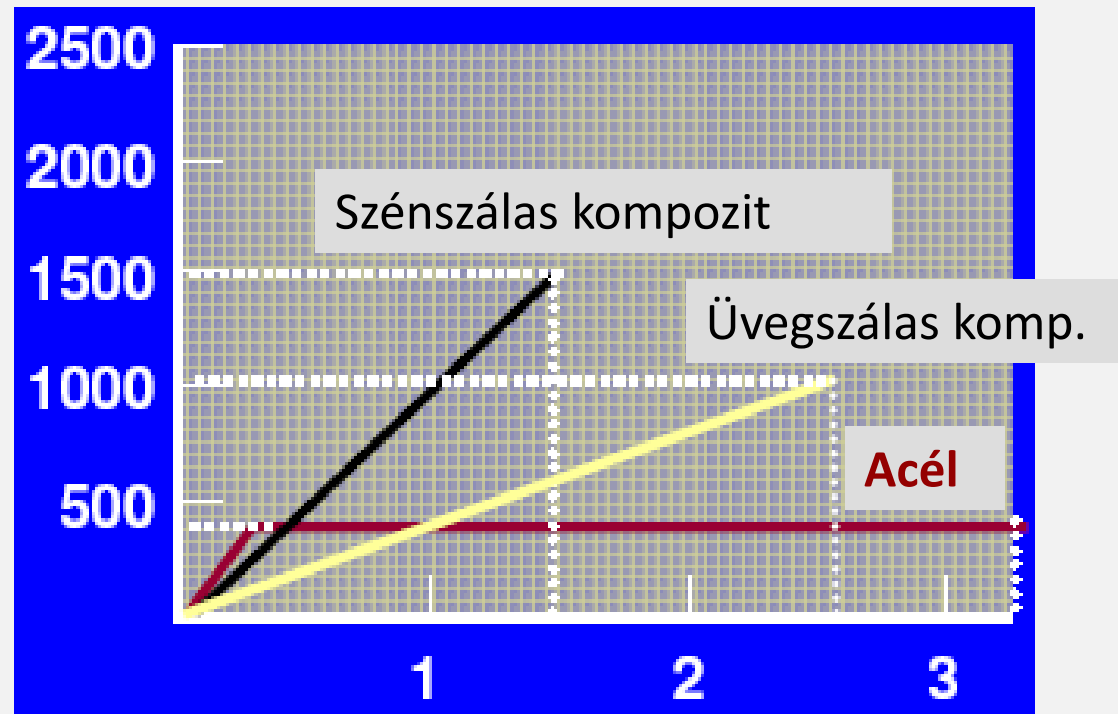
Különböző morfológiájú szálerősítéses kompozitok



- (a) folytonos, egyirányú szálak,
- (b) véletlenszerűen orientált, nem folyamatos szálak,
- (c) egymásra merőleges szálak,
- (d) rétegenként más-más irányú szálak.

A polimer kompozitok tulajdonságai az acélhoz képest

- Lineáris elasztikus jelleg a tönkremenetelig
- Nincs folyás
- Nagyobb szilárdság
- Kisebb szakadási nyúlás
- Versenyképes modulusz (Szénszálas kompozit)
- tömegcsökkenés!!!!



A polimer kompozitok tulajdonságai az acélhoz képest

Material	Ultimate Strength	Elastic Modulus	Failure Strain
Glass FRP	517-1207 MPa	30-55 GPa	2-4.5 %
Carbon FRP	1200-2410 MPa	147-165 GPa	1-1.5 %
Aramid FRP	1200-2068 MPa	50-74 GPa	2-2.6 %
Steel	483-690 MPa	200 GPa	>10 %

A szál-orientáció hatása

A polimer kompozitok ortotróp anyagok, a tulajdonságok irányfüggők

- **Unidirekcionális kompozitok**

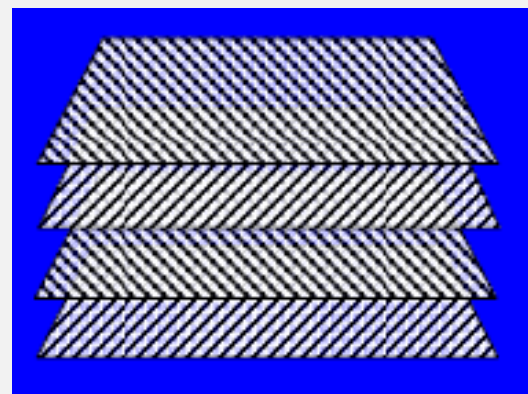
- A szálak egy irányban
- Nagyobb szilárdság és merevség szálirányban



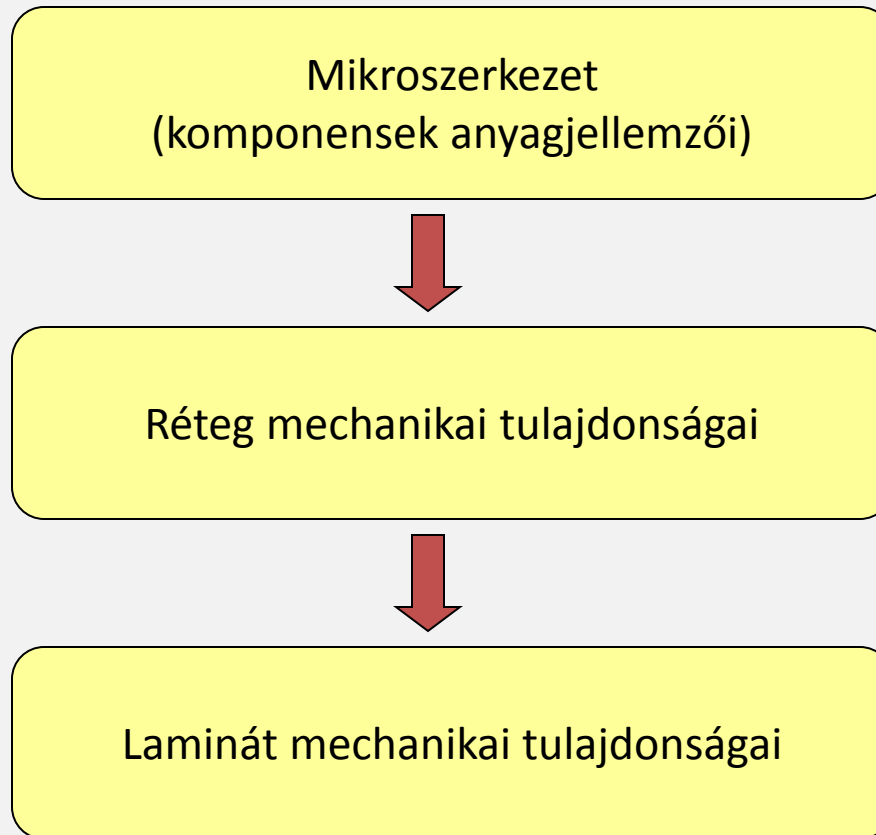
A szál-orientáció hatása

• **Multidirekcionális** kompozit laminátok

- a szálak különböző irányokban
- a tulajdonságok az igénybevételre szabhatók
- akár izotróp jelleg is



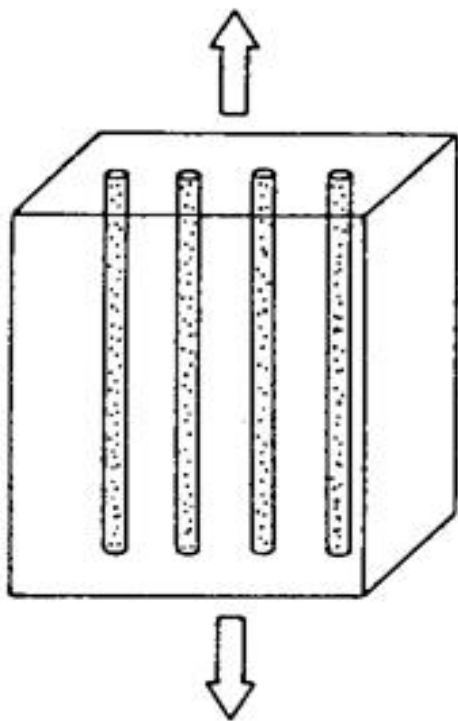
Többrétegű laminát mechanikai tulajdonságainak meghatározása



Hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága *a terhelés irányában*

Méretezéshez legfontosabb:

a kompozit (c) szakítószilárdságának és húzó rugalmassági modulusának kiszámítása a szál (f) és a mátrix(m) tulajdonságaiból



Ismert:

σ_f , σ_m , az összetevők szakítószilárdsága

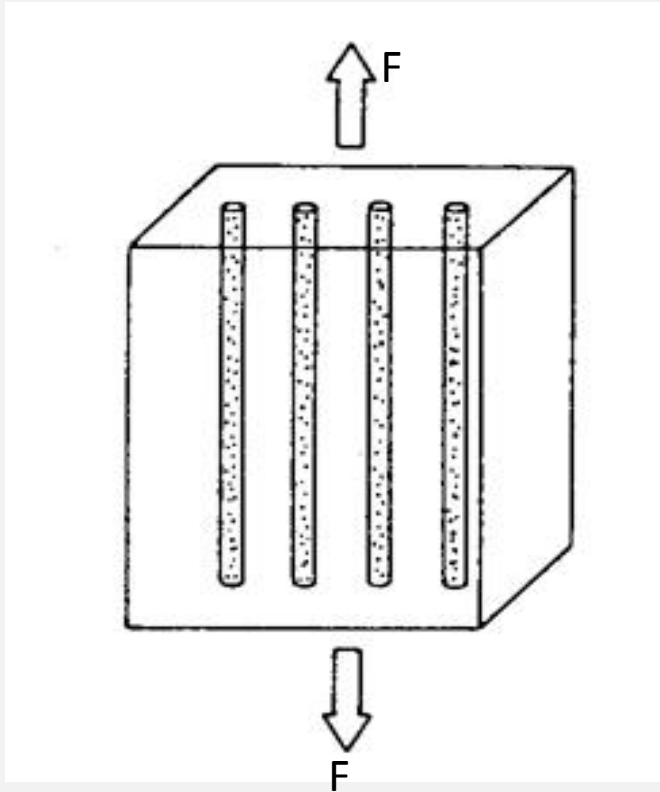
E_f , E_m , az összetevők Young modulusa

V_f : a száltartalom, térfogathányad

Hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága *a terhelés irányában*

Méretezéshez legfontosabb:

a kompozit (c) szakítószilárdságának és húzó rugalmassági modulusának kiszámítása a szál (f) és a mátrix(m) tulajdonságaiból



Azonos a deformáció a komponensekben, tehát:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad \text{és} \quad F_c = F_f + F_m$$

Mivel $F = \sigma \times A$

$$\sigma_c \times V_c = \sigma_f \times V_f + \sigma_m \times V_m$$

Hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága *a terhelés irányában*

$$\sigma_c \times V_c = \sigma_f \times V_f + \sigma_m \times V_m$$

Ha V_c egységnyi (=1), akkor $V_f=1-V_m$ $V_m=1-V_f$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

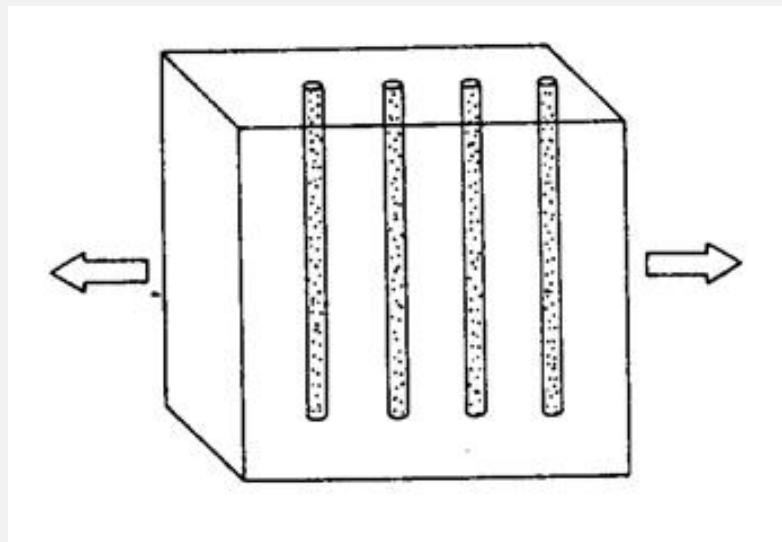
Hooke törvény+nyúlásazonosság miatt:

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Voigt-szabály, vagy egyszerű „keverési” szabály (rule of mixtures)

kontrakciót, illetve Poisson-tényezőt elhanyagolja,
az alkalmazások többségében jó közelítés

A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen



Ismert:

σ_f , σ_m , az összetevők szakítószilárdsága

E_f , E_m , az összetevők Young modulusa

V_f : a száltartalom, térfogathányad

A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

$$\Delta l_c = \Delta l_f + \Delta l_m$$

mivel $\varepsilon = \Delta l / l_0$ így

$$\varepsilon_c \cdot l_c = \varepsilon_f \cdot l_f + \varepsilon_m \cdot l_m$$

A Hooke törvény érvényességi tartományában $\varepsilon = \sigma / E$ alapján

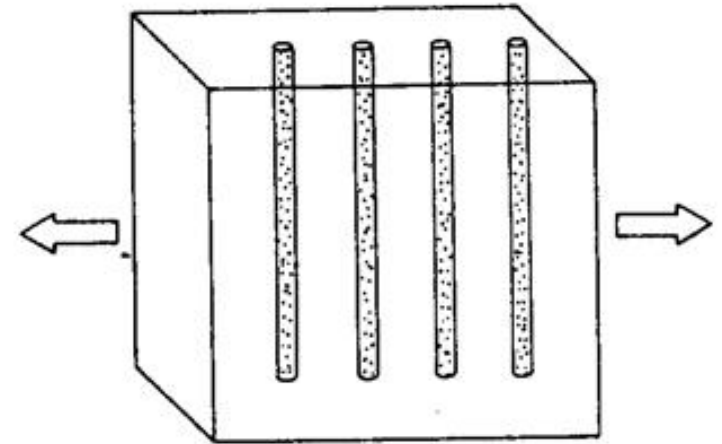
$$\frac{\sigma_c}{E_c} \cdot l_c = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot l_f + \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot l_m$$

Mivel a σ feszültség az egyes rétegekben (így a kompozit egészében) azonos, így

$$\frac{l_c}{E_c} = \frac{l_f}{E_f} + \frac{l_m}{E_m}$$

a rétegvastagságok aránya valójában térfogathányadot képvisel, így

$$\frac{V_c}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$



A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen

Ha a kompozit egységnyi térfogatában ($V_c=1$) V_f a szálerősítés térfogathányada és $1-V_f$ a matrix térfogathányada, akkor

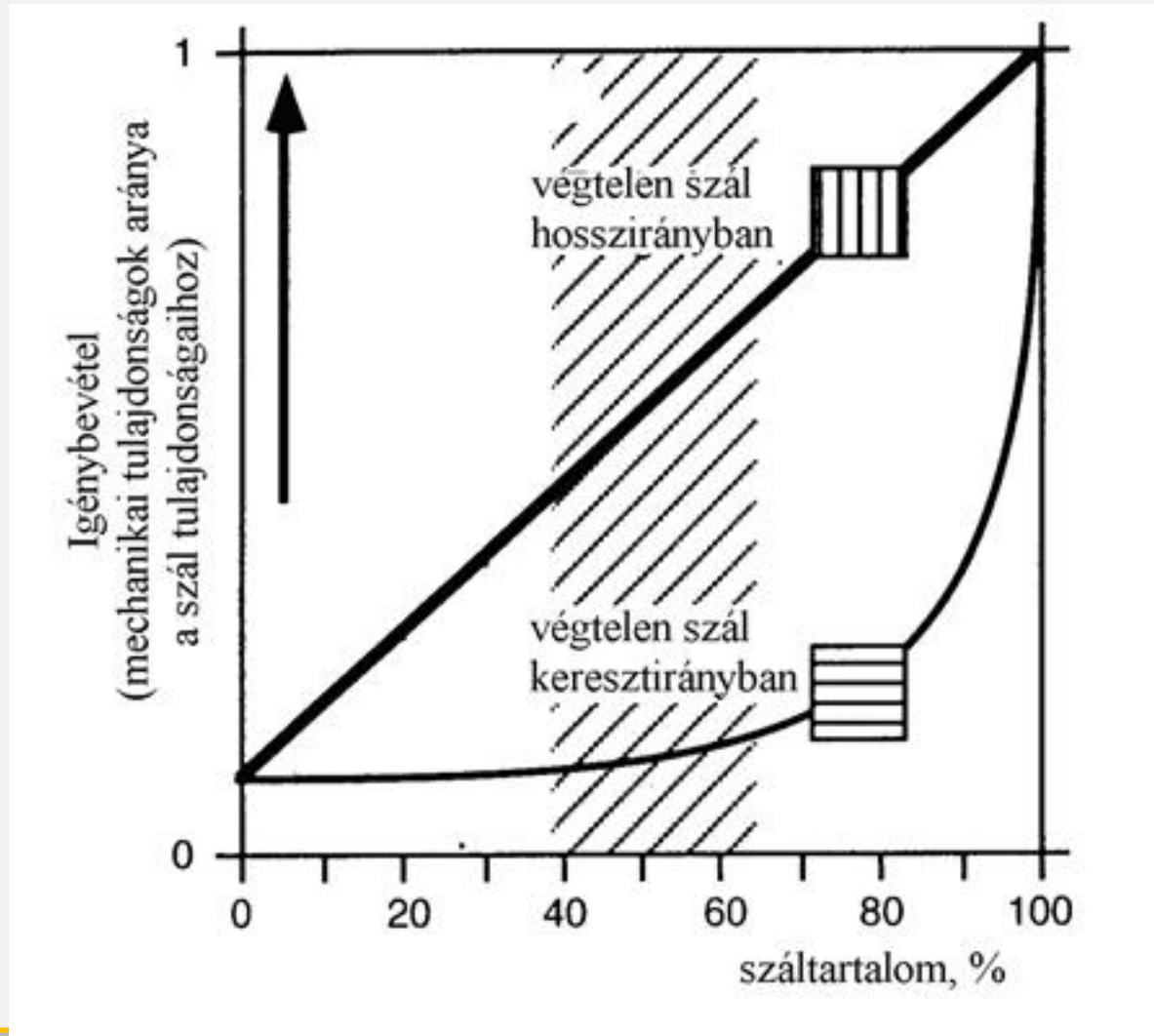
$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m}$$

ami átrendezés után

$$E_c = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}$$

Reuss- szabály: az összetevők moduluszából kiszámíthatjuk a kompozit moduluszát.

A terhelés irányában és az arra merőlegesen elhelyezett szálerősítés hatása közti lényeges különbség



A szálerősítés határai (geometriai és technológiai) a gyakorlatban:

$$0,35 < V_f < 0,65$$

Szálas erősítőanyag modulusza és szilárdsága is 1-2 nagyságrenddel a matrixénál.

Így *első közelítésben* a kompozitnak a szállal párhuzamosan mérhető szilárdságát és moduluszát *csak a szál* szilárdságából és moduluszából, a szál térfogathányadával arányosan számoljuk, a mátrixra vonatkozó összetevőt pedig elhanyagoljuk.

Közelítés szállal párhuzamos terhelésnél:

$$\sigma_{c,II} \approx \sigma_f \cdot V_f$$

$$E_{c,II} \approx E_f \cdot V_f$$

Közelítő egyenletek a szálerősítés irányára merőleges terhelésnél

a szálerősítés alig növeli a kompozit moduluszát és egyáltalán nem növeli szilárdságát.

csak a mátrix szilárdságával és moduluszával számolunk

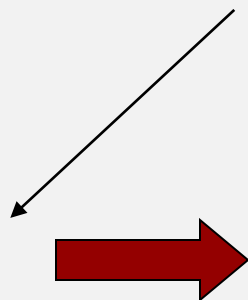
A szálerősítésre merőleges irányban mérhető modulusz a gyakorlatban jobb, mint az a *Reuss- szabályból* következik.

Vágott, rövid szállal erősített kompozitok

Kompozit alapelvek:

- nagyszilárdságú,
- lehetőleg nagy fajlagos felületű szál,
- jó tapadás a szál-mátrix határfelületen.

A szál még alkalmas,
legkisebb hossza
(rövidsége), pontosabban
 l/d aránya (<50)
ezzel a tapadással hozható
kapcsolatba.

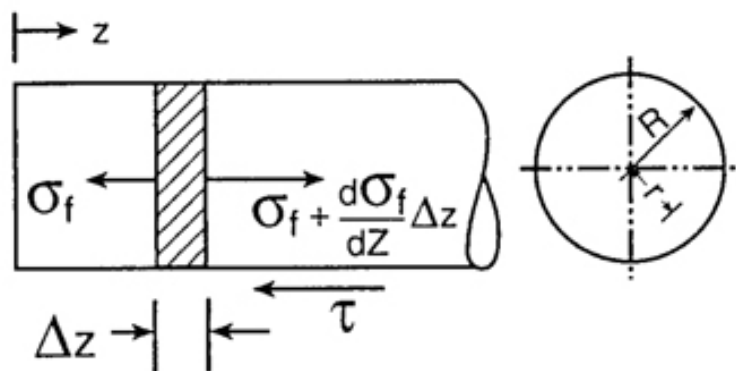


kritikus szálhossz,
amelynél rövidebb szál húzóigénybevétel
alkalmával a mátrixból kihúzódik

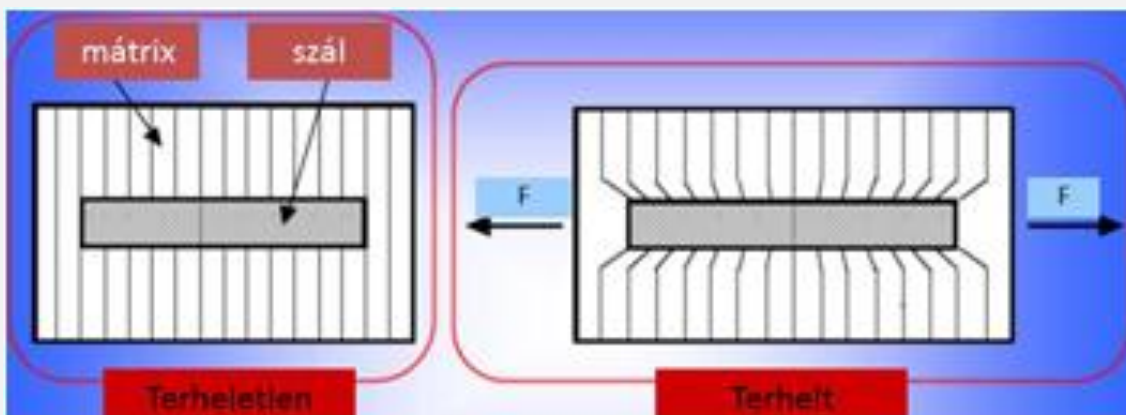
amelynél hosszabb szál a jó beágyazottság,
a jó tapadás következtében maga szakad el
a tönkremenetel pillanatában.

A kritikus szálhosszúság rövidszálas kompozitokban

Az összetett feszültségállapot jellemzésére különböző modelleket alkottak, a kritikus szálhosszúság (L_c) és a szálátmérő (D) viszonyát az ún. „Kelly-Tyson” (1965) összefüggés írja le:



τ a nyíróerő okozta feszültség a határfelületen,
 σ_f a szál szakítószilárdsága.

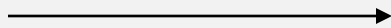


Kelly-Tyson összefüggés

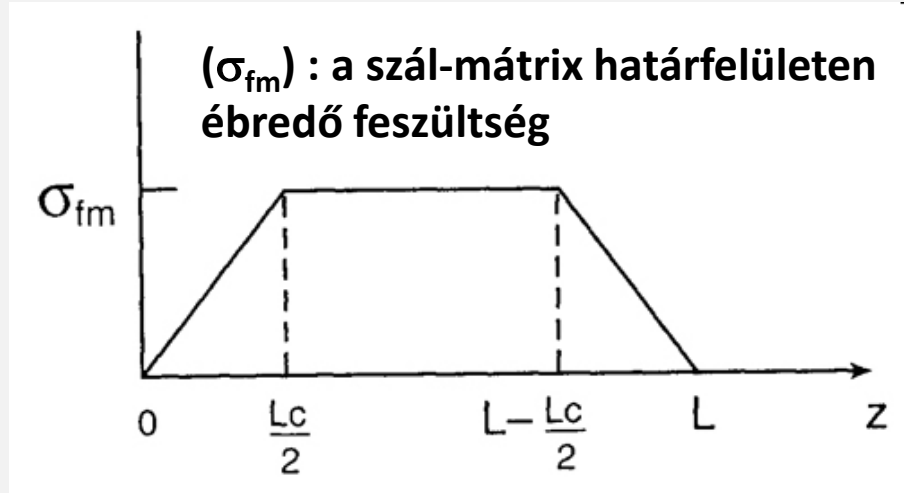
„Kelly-Tyson” összefüggés:

$$\frac{L_c}{D} = \frac{\sigma_f}{2\tau}$$

Adhézió javul



τ (MPa)	5	25	50	100	250
L_c / D	175	35	18	9	4
L^*_c (mm)	1,2	0,25	0,13	0,07	0,03



A kritikus szálhosszúság változása a határfelületi nyírófeszültség függvényében (* $D=7\ \mu\text{m}$ tipikus szálátmérő esetén)

- a technikailag elérhető *száltartalom* (V_f) *kisebb*, mint a nagyszilárdságú kompozitokban
- a hatékonyságot az L_c *korlátozza*,
- a *szálorientáció hatás*: a statisztikus eloszlásban orientált szálak közül csak a terheléssel közelítőleg párhuzamos szálak erősítenek igazán,
- a szálak orientációját az *ömladék-áramlás* erőteljesen befolyásolja.

A rövidszálas kompozitok modulusának kiszámítása:

$$E_c = \eta_{\Theta} \cdot \eta_l E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f)$$

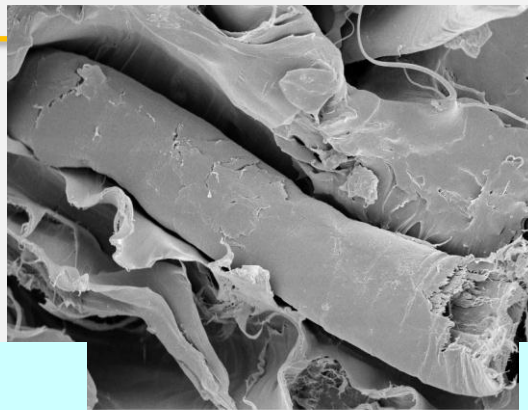
η_{Θ} = a szálorientációt figyelembevevő hatékonysági tényező

η_l = a szálhosszúságot figyelembevevő hatékonysági tényező

Rövidszálas, illetve hosszúszálas kompozitok definiálására az ún. **alaki tényezőt**, az l/d (szálhossz/szálátmérő) viszonyszámot használjuk.

A **kritikus szálhossznál** *hosszabb* szál a jó beágyazottság, a jó tapadás következtében *magá szakad* el a tönkremenetel pillanatában. A kritikus szálhosszúság (L_c) és a szálátmérő (D) viszonyát az ún. „Kelly-Tyson” összefüggés írja le.

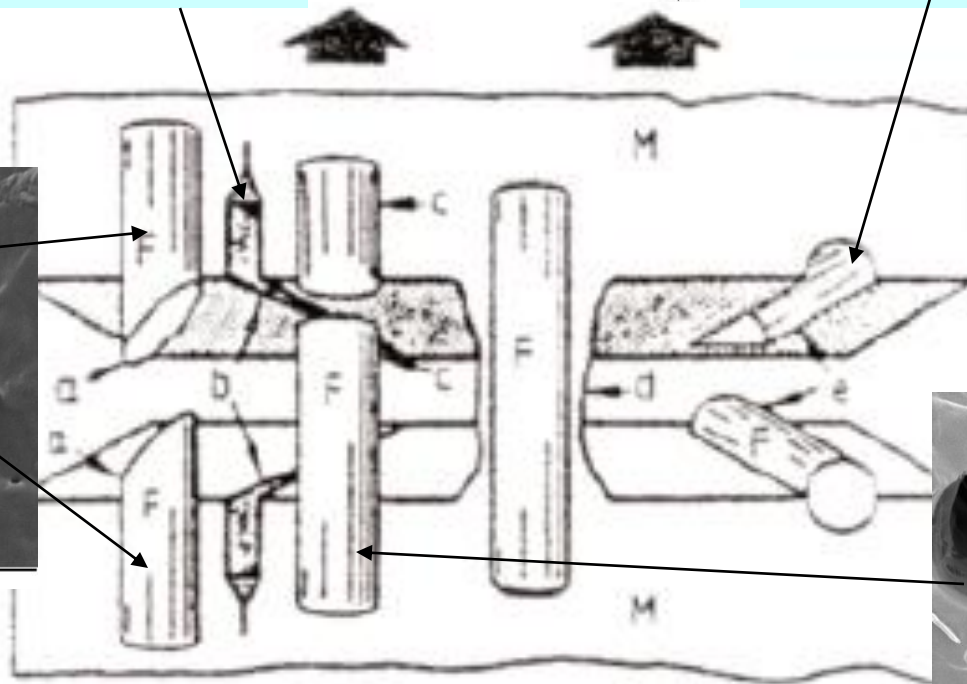
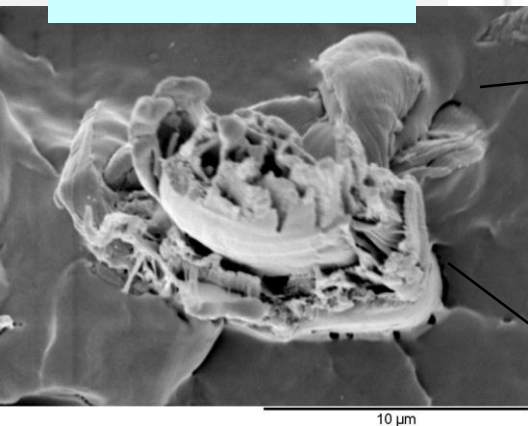
Polimer kompozitok tönkremeneteli formái



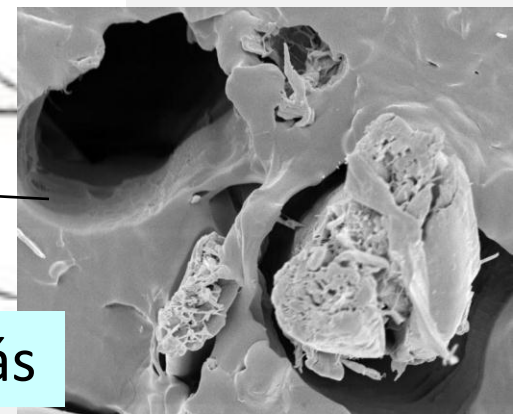
Mátrix törés

Szál-mátrix elválás

szálszakadás



szálkihúzóadás



A határfelületi adhézió mérésére, becslésére alkalmas eljárások

INDIREKT VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Valós kompozit szerkezet vizsgálata

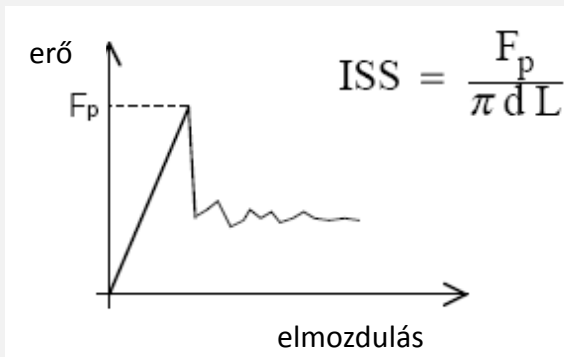
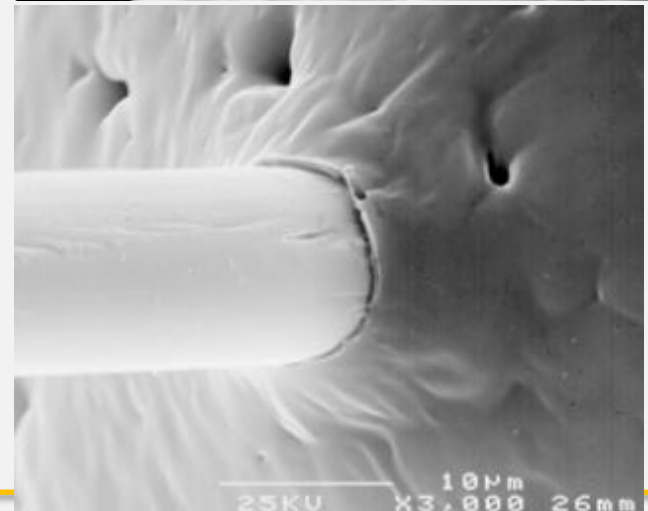
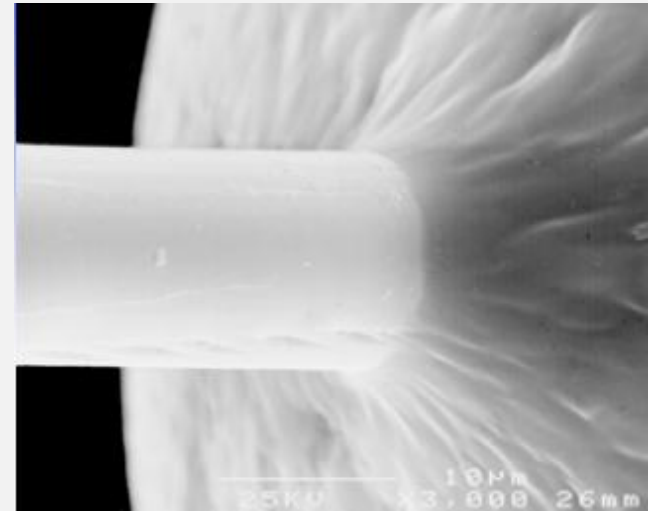
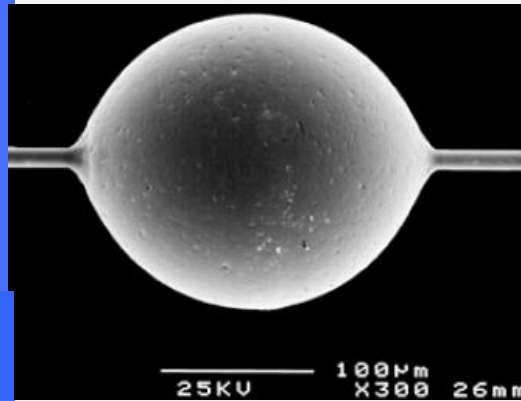
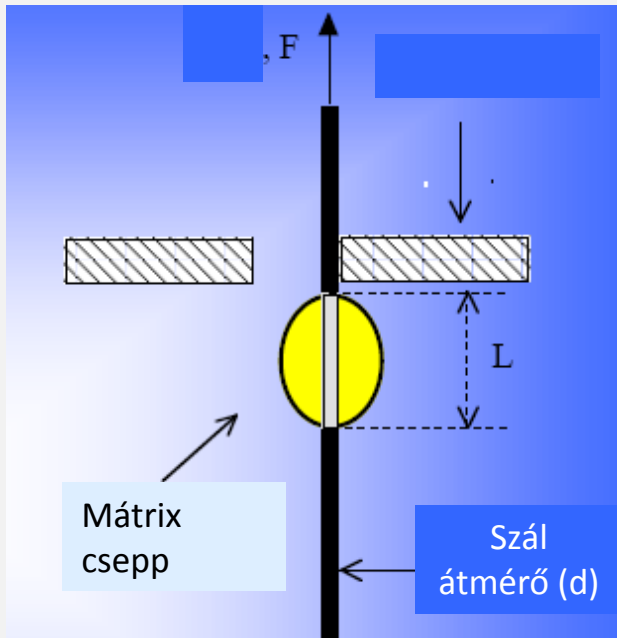
- húzó-,
- hajlító-,
- ütve hajlító-,
- rétegeközi nyíróvizsgálat, stb...

DIREKT VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Mikrokompozit vizsgálata (egyedileg beágyazott szál)

- szálkihúzás (pull-out),
- Mikrocsepp lehúzás,
- fragmentációs vizsgálat, stb...

Mikrocsepp lehúzás



ISS: határfelületi nyírófeszültség

Kompozit példák



POLIMERTECHNIKA

NGB_AJ050_1

Köszönöm a figyelmet!

hargitai@sze.hu

DR Hargitai Hajnalka

2011.10.19.