



A5/E5/M5/T5

Változat: 12.2

Kiadva: 2021. március 8.

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

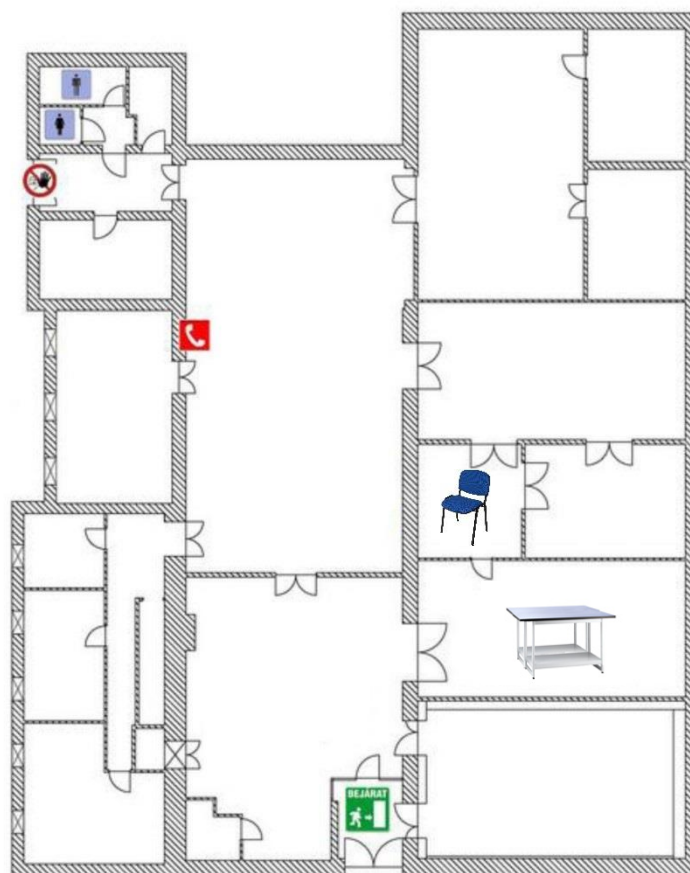
MT épület

Kompozitok

TÉRHÁLÓS POLIMER MÁTRIXÚ KOMPOZITOK

**A JEGYZET ÉRVÉNYESSÉGÉT A TANSZÉKI HONLAPON KELL ELLENŐRIZNI!
WWW.PT.BME.HU**

A LABORGYAKORLAT HELYSZÍNE (MT ÉPÜLET)



MT
épület

TARTALOMJEGYZÉK

1.	A GYAKORLAT CÉLJA	3
2.	ELMÉLETI HÁTTÉR	3
2.1.	A POLIMER KOMPOZITOK ERŐSÍTŐ ANYAGAI.....	4
2.2.	A SZÁLAK KISZERELÉSI FORMÁI.....	10
2.3.	A POLIMER KOMPOZITOK MÁTRIX ANYAGAI	11
2.4.	POLIMER KOMPOZIT TERMÉK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁI.....	13
2.5.	SZENDVICSSZERKEZET (VIDEO).....	16
3.	A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ FONTOSABB SZAVAK ANGOLUL, NÉMETÜL	17
4.	FELKÉSZÜLÉST SEGÍTŐ TÉMAKÖRÖK.....	17
5.	FELHASZNÁLT IRODALOM	18
	MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV	19

1. A gyakorlat célja

A gyakorlat során szálerősítésű, sűrűn térhálós (hőre keményedő) mátrixú termék kerül elkészítésre üvegszálal erősítőanyagból és poliészter gyantából. A hallgatók a kompozit terméket a hazai iparban legelterjedtebb és legegyszerűbb technikával, a kézi laminálás technológiájával állítják elő.

2. Elméleti háttér

A mérnöki gyakorlatban háromféle szerkezeti anyagcsoportot különböztetünk meg: fémek, polimerek és kerámiák. A kompozit olyan szerkezeti anyag, amely két vagy több anyag társításával jön létre.

A kompozitok a műszaki célú szerkezeti anyagok legkorszerűbb családját képezik. Kialakításuk abból a felismerésből jött létre, hogy az alkatrészek terhelése a legkritább esetben azonos a tér minden irányában. A legtöbb műszaki alkotásban, gépben, gépalkatrészben, építményben vagy bármely használati eszközben az igénybevétel, a terhelés jól meghatározható irányvonalak mentén érvényesül. Ezen erővonalak irányában gyakran nagyságrendekkel nagyobb szilárdságra, merevségre van szükség, mint más irányokban. Ez indokolja a homogén szerkezeti anyagok megerősítését nagyobb szilárdságú és/vagy modulusú erősítőanyagokkal, a teherviselés kitüntetett irányában.

A kompozit:

- **többfázisú** (alkotóiban fázishatárokkal elválasztott),
- **összetett**: több alkotóból álló szerkezeti anyag, amely
- **erősítőanyagból** (tipikusan szálerősítésből) és
- **befoglaló** (beágyazó) anyagból: mátrixból áll,

és az jellemzi, hogy

- **a nagy szilárdságú és rendszerint nagy rugalmassági modulusú (szálas) erősítőanyag és a**
- rendszerint **kisebb szilárdságú mátrix között**
- **kitűnő**, első vagy másodrendű kötések általi **adhéziós kapcsolat** van, amely
- **a deformáció, az igénybevétel magas szintjén is tartósan fennmarad.**

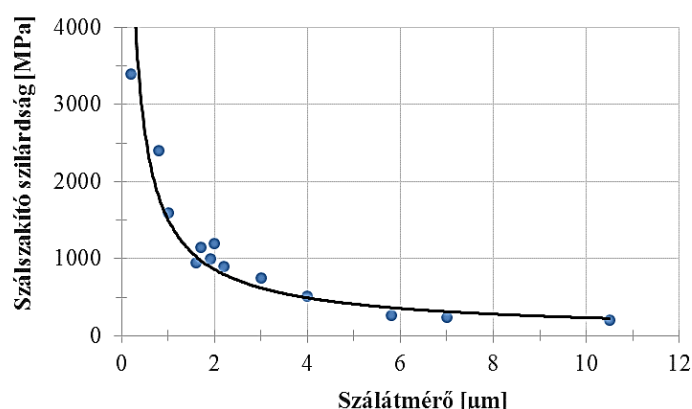
Az erősítőanyag szerepe, hogy biztosítsa a megfelelő merevséget és szilárdságot. A mátrixanyag szerepe, hogy összefogja a szálkötegeket, védje a szálakat a külső környezeti és fizikai

behatásoktól, illetve biztosítsa a terhelés eloszlását a keresztmetszet mentén (lekerül a terhelés a kisebb szilárdságú mátrixról az erősítő szálakra, és így tud a szál és a mátrix „harmóniában” működni).

A **polimer mátrixú kompozit** olyan szilárd anyagot jelent, amely legalább két alkotóból áll: az egyik a kisebb szilárdságú és relatív kis sűrűségű ($1-2 \text{ g/cm}^3$) hordozóanyag (mátrix), a másik pedig a nagy szilárdságú és/vagy nagy rugalmassági modulusú általában szálal erősítőanyag. A kompozitokban található alkotóelemek elhelyezkedését vizsgálva megállapítható, hogy a folytonos (mátrix) fázis teljesen körülveszi az abban finoman eloszlott másik fázist (erősítőanyag), emellett közöttük kitűnő kapcsolat (adhézió) van, amely a deformáció magas szintjén is fennmarad [1].

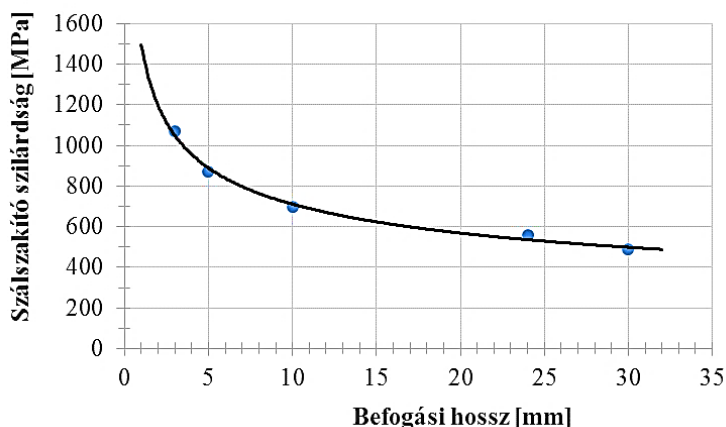
2.1. A polimer kompozitok erősítő anyagai

A polimer kompozitok legnépszerűbb erősítőanyagai a különböző szálal szerkezetek, azonban ismertek még lemezes, valamint különböző mikro-, illetve nano mérettartományba eső, részecske jellegű erősítőanyagok is. Ilyenek például a különböző agyagásványok (montmorillonit, hektorit), szén allotróp módosulatok (grafén, szén nanocsövek). A kompozitok szálal erősítőanyagaival kapcsolatban több paradoxon is ismeretes. Egyik közülük a **szálátmérő paradoxonja**, ugyanis az erősítőszálal átmérőjének csökkenése hatására csökken az elemi szál szakításához szükséges szakítóerő, de ugyanakkor növekszik a szál szakítószilárdsága (1. ábra). A jelenség oka, hogy a szál keresztmetszetében annak átmérőjével csökken a lehetséges hibahelyek (inhomogenitások, szennyeződések, légzárványok) száma.



1. ábra Az üvegszál szálszakító szilárdsága a szálátmérő függvényében [2]

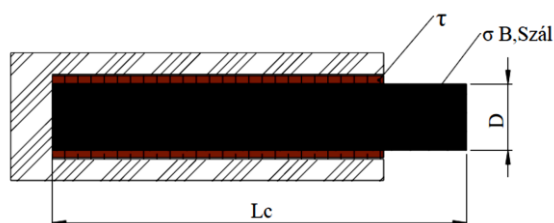
A második a szál **befogási hosszának paradoxonja**, amely hasonló jelenséghez vezet, mint a szálátmérő esetében. A rövidebb befogási szálhossz mentén kevesebb hibahely található az adott szálban, így a kisebb befogási hosszakhoz nagyobb szakítószilárdság értékek tartoznak (2. ábra).



2. ábra Az üvegszál szakító szilárdsága a befogási hossz függvényében [3]

A beágyazott szál hosszának rövidszálas (elsősorban fröccsöntéssel és extrúzióval előállított, hőre lágyuló mátrixú) kompozit alkatrészek esetére meghatározható egy kritikus minimum értéke, ami megadja, hogy mi az a minimális szálhossz, amit érdemes kompozit erősítőanyagként alkalmazni. Amennyiben az adott szálhossz nem éri el ezt a kritikus minimum (L_c) értéket, úgy terhelés hatására nem lesz képes maximális terhelést felvenni, azaz a szál szakítószilárdságának elérése előtt ki fog csúszni a befoglaló anyagból. A kritikus szálhossz meghatározható az adhéziónak a kapcsolat következtében a szál felületén ható nyírófeszültségének (τ), az elemi szál szakítószilárdságának ($\sigma_{B, Szál}$), valamint a szálátmérő (D) ismeretében az ún. **Kelly-Tyson összefüggés** (1) segítségével (3. ábra) [3]:

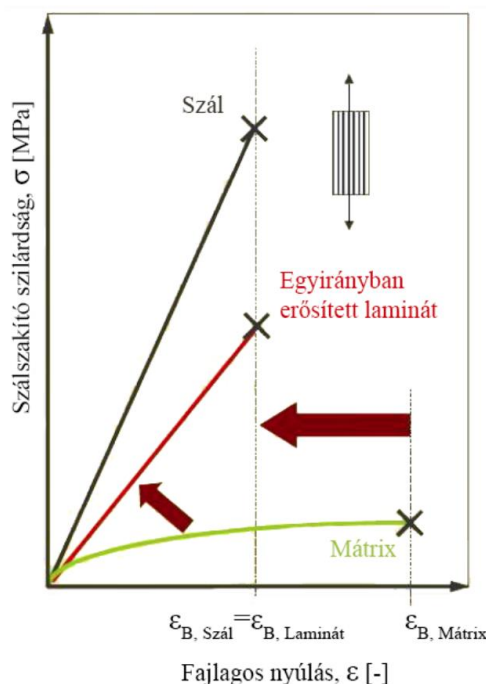
$$\frac{L_c}{D} = \frac{\sigma_{B, Szál}}{2\tau} \quad (1)$$



3. ábra A Kelly-Tyson összefüggés tagjainak jelentése [3]

Az egyenlethez szükséges tagok közül a D , a $\sigma_{B, Szál}$ és a határfelületi nyírófeszültség (τ) elemi szálak vizsgálatával határozható meg.

A harmadik jelenség maga a **kompozit anyag paradoxonja**, amelynek értelmében a kompozit olyan terhelés elviselésére képes, amely a gyengébbik komponens (a mátrix) tönkremenetelét okozná önmagában. A kompozit anyag szakadási nyúlását ($\epsilon_{B, \text{kompozit}}$) az erősítőszálak szakadási nyúlás értéke ($\epsilon_{B, \text{szál}}$) határozza meg, amíg a kompozit szakítószilárdsága és rugalmassági modulus értéke a két alkotó (szál és mátrix) értékei közé tehetők (4. ábra).



4. ábra A kompozit anyag és alkotó elemeinek szakítószilárdsága a megnyúlás függvényében [3]

Kompozit termékek gyártásához természetes (len, kender, szizál, stb.), ásványi (kerámia, bazalt stb.), természetes alapú mesterséges (viszkóz, acetát stb.) és mesterséges (üveg, szén, aramid, HOPE stb.) szálakat alkalmazhatunk. Ebben a sillabuszban a mesterséges szálak kerülnek bemutatásra részletesebben.

2.1.1. Üvegszál

Az üveg, mint szerkezeti anyag a szilikátok családjába tartozik. Elsősorban szilícium-dioxidból (SiO_2) áll, ez adja az üveg 55-65%-át. Emellett tartalmaz egyéb fémoxidokat is, amelyek a szilíciummal lényegében egyetlen óriásmolekulává egyesülnek, mégpedig elsődleges (primer), nagy kohéziós energiát képviselő kovalens- és ionos kötésekkel.

A szál gyártása során a megfelelően folyóképes üveg ömledékből fonófejen át nagyszilárdságú szálát húznak, rendszerint 10^3 db nagyságrendű elemi szálból álló köteg (roving)

formájában. Az elemi szálak átmérője jellemzően 8-17 μm között található. A megszilárdult rovingokat tekercsekbe csévélik majd különböző textil-feldolgozási technológiáknak vetik alá.

Az üvegszál, a többi elemi szálhoz hasonlóan felületkezelést igényel. Egyrészt meg kell védeni a feldolgozás – pl. szövés – során esetlegesen fellépő károsodástól; ezt nevezzük írezésnek. Az írezőanyag feladata tehát az ideiglenes védelem, és az összetartás. Másfelől biztosítani kell az üvegszál és a polimer mátrix közötti kapcsolódást, amelyet epoxivegyületek, vinilszilánok, esetleg fenolgyanta típusú kapcsolószerek felvitele biztosít.

Az üvegszál a legelterjedtebben alkalmazott erősítő szál, fizikai és mechanikai tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

Az üvegszál erősítés alkalmazásának előnyei:

- viszonylag olcsó (szén és aramid szálakhoz mérten),
- gyártásához szükséges alapanyagok nagy mennyiségben rendelkezésre állnak,
- UV stabil, vegyszerálló, elektromosan szigetel.

Hátránya:

- bizonyos technológiáknál erős koptató hatása van (ahol közvetlenül súrlódik a szerszámon, mint például fröccsszerszámban),
- viszonylag nagy sűrűség (szén, aramid, és PE szálhoz mérten, ld. 1. táblázat),
- törékeny,
- alacsony rugalmassági modulus (szénszálhoz mérten).

2.1.2. Szénszál

A szén kapcsolódási módjainak sokoldalúsága, a sokféle rendezettségi forma miatt, amelyet a szénláncok képeznek, a polimerek műszaki anyagtudományának középpontjában áll. A szintetikus polimerek műszaki tulajdonságait, a polimerlánc szilárdságát a szén-szén kötések szilárdsága biztosítja. A legnagyobb szén-szén kötőerő a legszigorúbb rendezett rendszerben közismert: a gyémánt a kovalens kötésrendszerével, valamint legmagasabb szintű rendezettségével a keménység mértékévé, etalonjává vált. A nagy fajlagos felületű korom, mint a gumi mátrixú kompozit aktív – kémiaiailag is kötődő – töltőanyaga, szintén régóta ismert. A szénből megalkotott erősítőszálban a szén grafitos szerkezetét hasznosítjuk.

A grafitszerkezet a hatszögletű egységekből felépített lamellák síkjának irányában rendkívüli szilárdságot biztosít. A szénszálakban ezt a rendkívüli grafit-szilárdságot, és az ezzel párosuló igen nagy modulust használjuk.

A szénszálgártás előterméke (prekursor) többféle polimerszál is lehet, ha azt úgy tudjuk elszenesíteni (magas, ~1000-2000°C hőfokon, inert, általában nitrogén atmoszférában karbonizálni majd grafitosítani), hogy közben ne kerüljön ömledék állapotba, ne égjen el, és a kívánt szénatomokban dús szerkezet alakuljon ki. Az elszenesítés és grafitizálás hőfoka és hőtartási ideje határozza meg a szál mechanikai tulajdonságait, egyben az árát is. Az így előállított szálak szilárdsága és modulusa széles határok között változtatható. 1997 óta a ZOLTEK cég Magyarországon is előállít PAN (poliakrilnitril) alapú szénszálat. A szénszálgártás prekursora lehet még pamutszál, kátrány vagy viszkóz szál is.

A szénszál erősítés alkalmazásának előnyei:

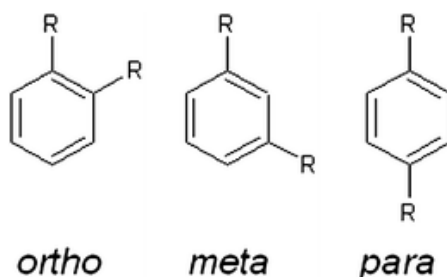
- alacsony sűrűség,
- nagy rugalmassági modulus,
- magas szilárdsági értékek (mindhárom az üvegszálhoz mérten),
- alacsony hőtágulási együttható.

Hátránya:

- viszonylag rideg (aramid és PE szálhoz képest),
- magas ár (függ a tiszta széntartalomtól).

2.1.3. Aramid szál

Az aromás poliamid (aramid) szálak a nagymértékű nyújtás hatására kialakuló nagyfokú orientáció következtében nyerik el nagy szilárdságukat. Két fő típusuk van: a para-, valamint a meta-kötéssel (5. ábra) kapcsolódó aramidok. A gyakorlatban a magas szakítószilárdságú para-kapcsolódású aramidok terjedtek el (márkanév: KEVLAR, TWARON, stb.). A szálak kitűnő szilárdsága és viszonylag magas szakadási nyúlása igen jól hasznosul a gumikompozitokban pl. a radiál-gumibroncsokban. Kitűnik továbbá, az aramid szállal erősített kompozit rendkívüli szívósságával, ütésállóságával (pl. golyóálló mellény), amely a molekuláris szerkezetből adódik.



5. ábra: orto-, meta-, para- kapcsolódási típusok

Az aramidszál erősítés alkalmazásának előnyei:

- alacsony sűrűség,
- magas szilárdsági értékek,
- jó dinamikai tulajdonságok,
- hajlékonyság,
- lángállóság.

Hátránya:

- környezeti hatásokkal szembeni gyenge ellenálló képesség (UV- és nedvességérzékenység),
- alacsony nyomószilárdsági értékek.

2.1.4. Polietilén szál

Az ultra nagy molekulatömegű úgynevezett UHMWPE (Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene) gél jellegű oldatból kiindulva (gélfázisú szálképzés), és nagymértékű orientációt alkalmazva igen nagy szilárdságú, könnyű polietilén szálakat lehet előállítani (márkanév: Spectra, Dyneema). Elterjedésüket két fő tényező gátolja: az egyik, hogy a PE hőállósága a nagy orientáltaságú polietilén, úgynevezett HOPE (Highly-Oriented-Polyethylene) esetén is korlátozott (maximum 140°C); a másik, hogy a PE csekély kötődést, adhéziót mutat más polimerekkel szemben, így a kompozit legfontosabb kritériumának, a szál-mátrix minél erősebb határfelületi kapcsolatának, csak különleges felületkezelésekkel tud megfelelni. Az erősítőszálak fontos tulajdonságait az 1. táblázat foglalja össze, összehasonlítva az acélhuzal főbb jellemzőivel.

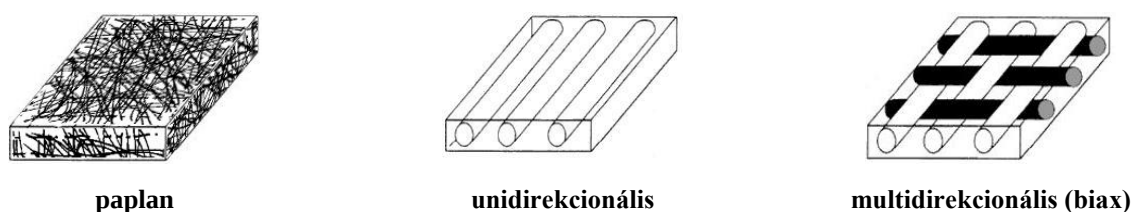
Szál típus	Sűrűség	Szakító szilárdság	Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás	Ár
	ρ [g/cm ³]	σ [GPa]	E [GPa]	ϵ [%]	Ár [€/m ²]
Üvegszál	2,50-2,80	3,2-4,6	70-85	1,8-5,7	2,5-3,0
Szénszál	1,70-2,00	2,0-7,0	200-700	0,5-1,5	28,0-30,0
Aramidszál	1,44	2,8-3,8	60-130	2,2-4,0	15,0-20,0
Polietilén szál (Spectra)	0,97	2,3-3,6	73-120	2,8-3,9	45,0-50,0
Acélhuzal (referenciaként)	7,60	4,0	240	1,4	1,0-2,0

1. táblázat Az erősítőszálak mechanikai tulajdonságai

2.2. A szálak kiserelési formái

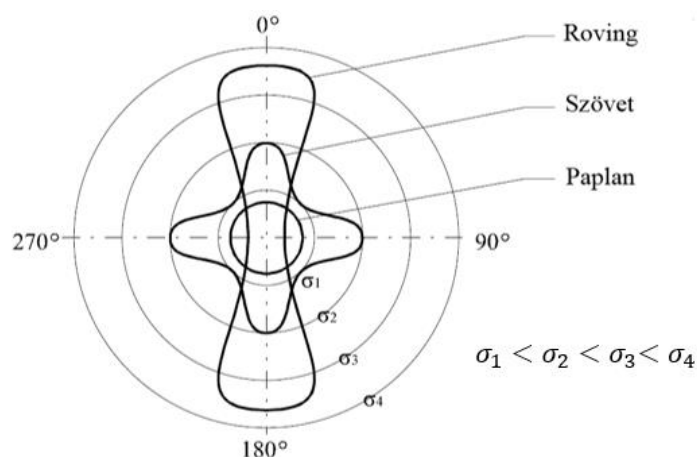
Az erősítőanyagok kereskedelmi forgalomban 1D, 2D, és 3D-s formában lelhetőek fel. 1D-snek hívjuk a roving (köteg) vagy szalag formában megjelenő szálhalmazokat. Szótt vagy nem szótt és kötött textíliák tartoznak a 2D-s csoportba. A tér mindhárom irányában erősítőanyagot tartalmaznak a tűzött kelmék és a rétegvastagság irányában is erősítőanyagot tartalmazó 3D-s kelme rendszerek.

A szálak irányultságának rendezésével bizonyos fokú orientáció érhető el (6. ábra). Az ún. **paplan típusú erősítőanyagok** a sík minden irányban tartalmaznak szálakat, nincs mechanikailag kitüntetett irány. Az **unidirekcionális rétegekben** (pl.: rovinggal erősített) a szálak egy irányba állnak, a mechanikai tulajdonságok ebben az irányban kimagaslóak. A szövésel készített erősítő rendszerek általában két egymásra merőleges kitüntetett iránnyal rendelkeznek, de léteznek **multidirekcionális/multiaxiális kelmék/szövetek** is (pl. a síkban két (biaxiális), három (triaxiális) vagy esetleg több (multiaxiális) kitüntetett irány is van).



6. ábra Erősítőanyagok főbb kiserelési formák [3]

Az egyes erősítőanyag formák mechanikai tulajdonságait ún. polárdiagramban szokás megjeleníteni. A fenti anyagok húzószilárdságának jellegét a terhelési szög függvényében, a 7. ábra polárdiagramban szemlélteti.



7. ábra Erősítőanyag kiserelési formák szakítószilárdságának polárdiagramja [3]

2.3. A polimer kompozitok mátrix anyagai

A kompozitok mátrixanyagaként többféle polimert használnak. A polimer mátrixok két nagy alapvető csoportra oszthatók: térhálósak és hőre lágyulók. Ahogy a nevük is mutatja, a feldolgozási folyamat során hőre van szükség. A hőre lágyuló polimerek (pl. polipropilén) ömledék állapotba hozás – alakadás – hűtés folyamattal dolgozhatók fel. A folyamat végén nem jön létre térhálós szerkezet, így e lépések reverzibilisek. Hőre lágyuló polimereket általában rövid (1-5 mm) szálakhoz használnak mátrixanyagként, amelyeket fröccsöntéssel, vagy extrúzióval dolgoznak fel. Megjelentek újabban az önerősített polimerek is, amelyekben mind a szál, mind a mátrix azonos alapanyagú, hőre lágyuló polimerből készül.

Napjainkban elsősorban hőre nem lágyuló (sűrűn térhálós) gyantákat használnak a nagy teljesítményű kompozitok előállításához. A sűrűn térhálós anyagok (pl. epoxigyanta, poliészter, vinilészter, poliidid) folyadék halmazállapotból, egy irreverzibilis folyamat végén, térhálós szerkezetű szilárd halmazállapotba mennek át. Ha ez megtörtént, többé már nem hozhatóak folyadék halmazállapotba, habár a hőmérséklet változtatása jelentősen befolyásolja mechanikai tulajdonságaikat. Nagy előnyük, hogy szobahőmérsékleten feldolgozásuk során folyékonyak és feldolgozásukhoz - ellentétben pl. a fröccsöntéssel - nem szükséges nagy nyomás. Előnyük még a relatív alacsony árfekvésük, azonban nagy hátrányuk, hogy újrahasznosításuk ipari méretekben még nem megoldott. Az iparban jelenleg a két leggyakrabban használt sűrűn térhálós gyanta az epoxigyanta és a telítetlen poliészter gyanta. A szálerősített kompozitok szilárdságát döntő mértékben az erősítőszál tulajdonsága határozza meg, mivel a beágyazó polimer mátrix szilárdsága és modulusa általában ennél körülbelül két nagyságrenddel kisebb.

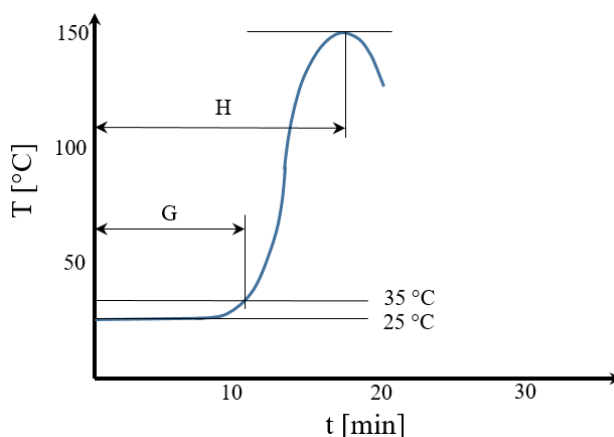
Az alkalmazható gyanták jellemzéséhez szükség van a viszkozitás fogalmának ismertetésére: a **viszkozitás** egy közeg ellenállásának mértéke a csúsztató feszültség okozta alakváltozással szemben, és fel lehet úgy is fogni, hogy nem más, mint a közeg belső súrlódása. Például a víz "folyósabb", kisebb a viszkozitása, amíg az étolaj vagy a méz "sűrűn folyós", nagyobb a viszkozitása.

2.3.1. Poliészter

A poliészter, amely kétértékű karbonsavból és kétértékű alkoholból épül fel, a legelterjedtebb gyantatípus. Ezen komponensek reakciójával keletkezik a poliészter gyanta (oligomer), amelyhez a viszkozitás csökkentése érdekében általában sztirolt adnak. A sztirol emellett abban is szerepet játszik, hogy a poliészter láncok között keresztkötések keletkezhesse, melléktermék megjelenése

nélkül. A feldolgozás során a gyantához iniciátort adnak, amely elbomlik és megindítja a polimerizációs láncreakciót. Az iniciátor mellett katalizátort is alkalmaznak, amely nem vesz részt a kémiai reakcióban, csak katalizálja azt, vagyis egy másik, alacsonyabb energiájú reakcióutat nyit meg, így a feldolgozás gyorsan és akár szobahőmérsékleten is elvégezhető. A polimerizációs láncreakció során a molekulatömeg monoton növekszik, miközben keresztkötések (térháló) is kialakulnak. Ennek hatására az anyag viszkozitása folyamatosan nő, egy idő után pedig bekövetkezik a gélesedés (G: gélesedési idő). A gélesedéskor a folyadék szilárd jellegűt kezd mutatni, vagyis innentől kezdve már nem feldolgozható.

A polimerizációs-térhálósodási reakció egy exoterm, hő fejlődéssel járó folyamat, amelynek hatására a gyanta hőmérséklete akár 100-120 °C-ot is emelkedhet. A térhálósodási folyamat során tapasztalható egy exoterm csúcs, amelyhez tartozó időpillanat (H: kikeményedési idő) után a térhálósodási folyamat, azaz a keresztkötések kialakulásának sebessége nagymértékben, folyamatosan csökken, a poliészter hőmérséklete ezután lassan eléri a környezeti hőmérsékletet (8. ábra). A poliészter gyanták csak korlátozott ideig tárolhatók, mivel egy bizonyos idő elteltével maguktól gélesedni kezdenek. A poliészter gyanta ára jellemzően ~1500 Ft/kg (2020).



8. ábra A poliészter gyanta térhálósodásának exoterm hőeffektusa [1]
(G - gélesedési idő; H - térhálósodási idő)

2.3.2. Epoxigyanta

A sűrűn térhálós polimer gyanták közül - általános felhasználás szempontjából - az epoxigyanta az egyik legjobb választás, és magas minőségi követelményű területeken is gyakran alkalmazzák. Mind mechanikai tulajdonságaiban, mind a környezeti hatásokkal szembeni ellenálló képességében megelőzi a többi általános felhasználású gyantát, így előszeretettel alkalmazzák olyan iparágakban, mint pl. a repülőgépgyártás.

Az epoxigyantának számos jó tulajdonsága van. Egyik ilyen, hogy kicsi a viszkozitása, ezért szobahőmérsékleten is könnyen kitölti a rendelkezésre álló teret (pl. a szerszámot). Másik nagy előnye, hogy csak kis mértékben zsugorodik, így minimálissá válik a térhálósodás utáni belső feszültség és méretpontos termék készíthető vele.

A poliészter gyantákhoz hasonlóan az epoxigyantákat is főleg erősítő-, ill. töltőanyaggal társítva használják fel. Az epoxigyantával készített kompozitok – azonos erősítőszálak esetében – kedvezőbb szilárdsági és merevségi értéket mutatnak, mint a poliészter gyantával készítek; ez elsősorban a tartós, ill. a ciklikus (váltakozó) terhelésre vonatkozik. Az epoxigyanta ára jellemzően ~5000 Ft/kg (2020).

2.3.3. Egyéb mátrix anyagok

A fentiekén kívül speciális célokra mátrixanyagként használnak még vinilészter gyantákat (vegyszerállóság + hőállóság), furán gyantákat (vegyszerállóság), illetve akril gyantákat (kémiai ellenállóság), stb.

2.4. Polimer kompozit termék gyártástechnológiái

A réteges felépítés biztosítja a szálerősített kompozit konstrukció legfőbb műszaki előnyét: a teljes alkatrész, termék szilárdságát, illetve merevségét minimális önsúly mellett úgy optimalizáljuk, hogy az igénybevétel erővonalai mentén kapjuk a legjobb tulajdonságokat. A konstrukciós feladat lépései tehát a fő terhelés irányok meghatározása, a rétegek méretezése, és nem utolsósorban a rétegrend kialakítása. Mindezek közben figyelemmel kell lenni a termék gyárthatóságára is (költségek, szériaszám, technológia stb.), amely alapján a gyártástechnológiát lehet kiválasztani.

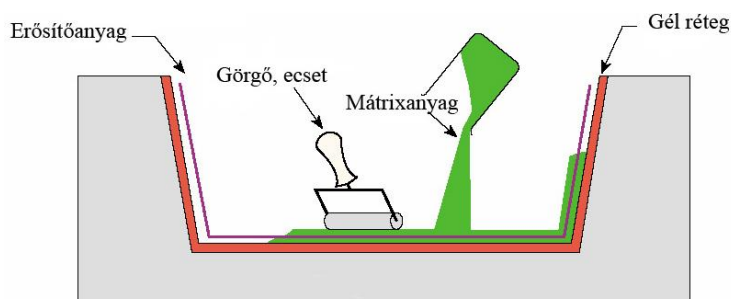
A technológia egyik kulcskérdése a térhálósítás közben tartása: az oligomert és monomert is tartalmazó mátrix alapanyag teljes átalakítása térhálós szerkezetűvé (konverzió). A gyakorlatban fontos, hogy végbe menjen a teljes konverzió, azaz a reaktív csoportok közel 100%-a átalakuljon, mivel a fizikai, mechanikai és kémiai tulajdonságok jelentősen függenek ezen konverzió mértékétől. A maradék, nem reagált monomer jelentősen módosíthatja a termék öregedését, fizikai és mechanikai tulajdonságait.

Kompozit alkatrészek gyártására igen sok technológia áll rendelkezésre. A gyakorlat során kézi laminálással állítjuk elő a kompozit mintadarabot, így ezt részletesebben tárgyaljuk.

2.4.1. Kézi laminálás ([video](#))

Az erősítő rétegek kézzel történő egymásra illesztésével (hand-lay-up, lamination) építették fel mintegy 50 éve az első modern polimer kompozit termékeket sorozatgyártásban: így készültek, pl. a szövetségesek partraszállásakor felhasznált üvegszálas poliészter kompozit hajók. Ez a technológia alacsony költségei és széleskörű alkalmazhatósága miatt a legelterjedtebb. Prototípus, illetve kis sorozatgyártás esetén a leggazdaságosabb. Az eljárás hátránya a nehézkes reprodukálhatóság, a hibahelyek jelenléte és a nehezen kézben tartható gyantataralom.

A kézi laminálás alapelvét a 9. ábra szemlélteti. A pozitív vagy negatív szerszám felületét formaleválasztóval kell kezelni, hogy a termék a szerszámból eltávolítható legyen. A termék külső rétege általában egy úgynevezett gél réteg (gelcoat), ez a gyantában dús töltött réteg áll ellen a környezeti hatásoknak (időjárás, mechanikai behatások). Ezt követően kerülnek felhordásra a termék teherviselő rétegei, erősítőanyag rétegek kerülnek átításra görgők, hengerek, illetve ecsetek segítségével. A legfontosabb, hogy tömör, légzárvány nélküli terméket készítsünk, ehhez nyújt segítséget a levegő kigörgőzése a már átimpregnált rétegekből.



9. ábra A kézi laminálás alapelve

A kész kompozit lemez akár több tíz rétegből is állhat, ehhez legfőképpen a megfelelő gyanta kiválasztására kell ügyelni (gélidő, exoterm hőcsúcs). A laminát tartalmazhat jelentős erősítéseket, megvastagításokat, bordákat, fém-betétet, valamint felépülhet szendvicsszerkezetként is.

A térhálósítás az alkalmazott gyantarendszernek megfelelően általában szobahőmérsékleten, de egyes esetekben emelt hőfokon is történhet. Utólagos, emelt hőfokú térhálósítás a közel teljes konverzió szempontjából minden esetben ajánlatos. Ezt követően a termék méretre vágása, szélezése ill., utólagos szerelése történik.

2.4.2. Egyéb gyártástechnológiák

Az egyes technológiák közös jellemzője, hogy kontrollált hő- és nyomásviszonyok mellett a folyékony halmazállapotú mátrixanyagból és a szálas szerkezetű erősítőanyagból térhálós szerkezetű termék készíthető. Az alábbiakban a legfontosabb és legelterjedtebb technológiák kerülnek rövid bemutatásra.

Szórás ([video](#)): A laminálásos technológia némileg „gépesített” változata, egy speciális szórófejen keresztül vágott szál és mátrixanyag keveréke kerül felszórásra egy szerszám felületére. Nagyméretű termékek készíthetők gazdaságosan így (pl.: hajótestek, lemezszerű panelek).

Sajtolás ([video](#)): Nagy sorozatoknál alkalmazott gyártástechnológia; hidraulikus présgépeket, fűthető fém szerszámokat, illeszkedő precíz szerszámfeleket alkalmazva. A mátrix- és erősítőanyag már előre összekeverve kerül a szerszámfelek közé. Viszonylag rövid ciklusidővel, hosszú sorozatban gyártott termékek előállítására alkalmas technológia, pl. autóiparban, ajtó kárpit, belső burkoló elemek stb.

Tekercselés ([video](#)): Forgó, tengelyszimmetrikus (általában hengeres, kúpos) magra gyantával impregnált folytonos szálakat tekercselnek fel. A rovingok fektetési szöge (tekercselési szög) az igénybevételnek megfelelően előre számítható. A készterméket a magról lehúzzák, ezért szükséges, hogy a szerszám enyhén kúpos legyen. Főleg tartályok, csövek előállításához alkalmazható.

Pultrúzió ([video](#)): A hosszirányban folytonos szállal erősített kompozit profilgyártás a hőre lágyuló alapanyagú extrúzióhoz hasonló eljárás, azzal a lényeges különbséggel, hogy itt az impregnált erősítőanyagot áthúzzák a fűtött szerszámon. Ez az egyetlen folytonos, sűrűn térhálós mátrixú kompozit gyártástechnológia, amely profilok, 1D-s termékek gyártására alkalmas (pl. gerendák, tartószerkezetek merevítései, lapátnyel, kábelek).

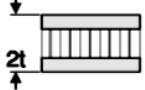
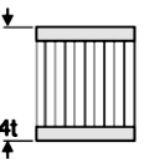
Injektálás ([video 1](#); [video 2](#); [video 3](#)): A szerszámba „szárazon” kerül befektetésre az erősítőanyag. A zárt szerszámba túlnyomás vagy vákuum segítségével juttatjuk be a mátrixanyagot. A mátrixanyag áramlása során impregnálja az erősítőanyagot. A viszonylag csekély számú hibahely (szennyeződés, légzárvány) miatt nagyon jó mechanikai tulajdonságokkal, kiváló minőségű termékek készíthetők injektálással (pl.: repülőgép-, vagy nagy teljesítményű gépalkatrészek)

Autoklávós gyártás ([video](#)): A technológia lényege, hogy a gyártás során előimpregnált erősítőanyag (prepreg) kerül kivágásra, majd tervezett módon elhelyezésre egy merev szerszám felületére. A felhelyezést követően légmentesen lezárják a felépített rétegrendet, és jellemzően

vákuum alatt tartva behelyezik az autoklávba, amely egy fűthető nyomásálló tartály. A berendezés belsejében az anyagok nagy nyomáson emelt hőmérsékleten térhálósodnak és így készül el a kompozit termék. Kiváló minőség (kevés zárvány, szabályozott gyantatartalom, kiváló mechanikai tulajdonságok) és magas ár jellemzi, ezért a repülőgépiparban és technikai versenysportokban (F1) alkalmazzák elsősorban.

2.5. Szendvicsszerkezet ([video](#))

A szendvicsszerkezet olyan két, egymással párhuzamos, sík vagy görbült felületű nagy szilárdságú lemez (fedőlemez, héj), amely között könnyű, kis szilárdságú, a fedőlemezeknél lényegesen nagyobb vastagságú anyag (maganyag) helyezkedik el oly módon, hogy a három réteg egy mechanikai egységet képezzen. A szendvicsszerkezetek jellemzője a kis tömegű anyagmennyiséggel elérhető **nagy hajlítómerevség** növekmény, amelyet a másodrendű nyomaték változása eredményez. A szendvicsszerkezettel elérhető tulajdonságjavulásokat a 10. ábra szemlélteti. A kompozitok, a fémeket megközelítő vagy meghaladó szakítószilárdsággal, de néha azoknál lényegesen kisebb rugalmassági modulussal rendelkeznek. Ennek következtében az ilyen anyagokból készült héjszerkezetnél merevségi problémák léphetnek fel, amelyet vagy költséges vastagságnöveléssel, vagy bonyolult és nem esztétikus bordázással, esetleg szendvics kialakítással lehet megoldani. A szendvicsszerkezetek elterjedésének másik oka, hogy technológiailag könnyen lehet szendvicsszerkezetet előállítani.

	Tömör laminát	Magréteg - 1t	Magréteg - 3t
			
Hajlító merevség	X	7 X	37 X
Hajlító szilárdság	Y	3,5 Y	9,2 Y
Tömeg	Z	1,03 Z	1,06 Z

10. ábra A szendvicsszerkezet alkalmazásának előnyei

A kompozit szendvicsszerkezeteket többféle módon készíthetjük:

- Elkészítik formában a két erősített kompozit fedőlemezt, majd ezek közé ragasztják a maganyagot.

- Elkészítik a fedőlemezeket, majd a két héj közé habosítják a maganyagot.
- A formában lévő, még lágy, nem térhálósodott kompozit lemezre rászorítják a maganyagot, a lemezt térhálósítják – ezáltal a maganyag a lemezhez tapad –, majd vagy formában, vagy a formából kivéve a másik fedőlemezt rárétegzik a maganyag szabad felületére.
- Előre lesabott, hajlított vagy összeállított maganyagra, mint szilárd szerkezetre két oldalról rárétegzik a kompozit fedőrétegeket.

A felhasználható maganyagoknak igen sokféle típusa ismert, anyaguk lehet papír, alumínium, polimer, fa ([video](#)). Leggyakrabban habosított polimer maganyaggal találkozhatunk, pl.: PUR, PVC.

3. A témához kapcsolódó fontosabb szavak angolul, németül

Magyar	Angol	Német
gyanta	resin	s Harz
héj, fedőlemez	shell, skin	e Deckschicht
kompozit	composite	r Faserverbundwerkstoff
maganyag	core	r Kernmaterial
paplan	mat	e Fasermatte
szálerősítés	fiber reinforcement	e Faserverstärkung
száltartalom	fiber content	r Fasergehalt
szendvicsszerkezet	sandwich structure	r Kernverbund
szénszál	carbon fiber	e Kohlenstoff-Faser
szövet	woven structure, fabrics	s Gewebe
üvegszál	glass fiber	e Glasfaser

4. Felkészülést segítő témakörök

- Mi a kompozit definíciója? Miért alkalmazunk polimer kompozitokat?
- Mik a jellemző erősítőanyagok? Hogyan gyártják ezeket? Melyek ezek főbb tulajdonságai?
- Mik a jellemző polimer mátrix anyagok? Melyek ezek főbb tulajdonságai?
- Mik a szálak kiserelési formái, mik a jellemzőik?
- Mik a különböző gyártástechnológiák lépései, előnyei/hátrányai?
- Mik a szendvicsszerkezetek és azok főbb jellemzői?

5. Felhasznált irodalom

1. Czvikovszky, T., Nagy, P., Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000)
2. Yi, X., Du, S., Zhang, L.: Composite Materials Engineering, Chemical Industry Press, Beijing and Springer Nature Singapore Pte Ltd, Singapore (2018)
3. Lengsfeld, H., Wolff-Fabris, F., Krämer, J., Lacalle, J., Altstädt, V.: Composite Technology, Hanser, New York (2016)
4. Kollár, L. P., Springer, G.S.: Mechanics of Composite Structures, Cambridge University Press, Cambridge (2009)

Köpeny, gumikesztyű, védőszemüveg használata a gyakorlat során kötelező, amelyeket a Tanszék biztosít a hallgatók részére is!

A felhasznált vegyi anyagok egészségre ártalmasak lehetnek, részben tűzveszélyesek.

Gyanta, katalizátor, illetve aceton nyálkahártyához nem juthat.

A bőr szennyeződése esetén azonnal szappanos vizes mosás alkalmazandó!

A segédletben szereplő, a tananyag megértését segítő videók QR-kódja:

Kézi
laminálás



Szórás



Sajtolás



Tekercselés



Pultrúzió



Autokláv
gyártás



Injektálás



Szendvicsszerkezet
gyártás



Szendvicsszerkezet
maganyagok



MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV

Név:

Értékelés:

Neptun kód:

Dátum:

Ellenőrizte:

Gyakorlatvezető:

1. A gyakorlat menete

A gyakorlat során szálerősített telítetlen poliészter mátrixú kompozitokat állítunk elő, ennek menete:

- A védő öltözet (köpeny, gumikesztyű, védőszemüveg) felvétele.
- A szerszám előkészítése, portalanítása, majd felületkezelése.
- Az erősítő rétegek (paplan/szövet) kiszabása, mátrixanyag kimérése, iniciálása.
- Kompozit termék előállítása kézi laminálással; felhasznált eszközök tisztítása.

2. Felhasznált anyagok

Mátrix anyag: Telítetlen poliészter gyanta

Erősítőanyag: Üvegszál/szénszál

3. Számítási feladat

Kritikus szálhossz (L_c) meghatározása Kelly-Tyson összefüggés segítségével a gyakorlaton megadott **sorszámú** paraméterek alapján (2. táblázat): az $L_c = \dots\dots\dots$ **mm**.

Sorszám	D [μm]	$\sigma_{(B, Szál)}$ [MPa]	τ [MPa]
1	6,6	1500	10
2	7,3	2500	25
3	11,2	1000	20
4	13,6	1300	11
5	15,5	1600	16
6	30,1	2000	8
7	32,2	1400	22
8	40,1	1100	9
9	43,2	1000	11
10	50,7	997	20
11	55,2	800	12
12	59,8	1400	18

2. táblázat A kritikus szálhossz meghatározásához szükséges paraméterek