



**MAGYAR MÉRNÖKI
KAMARA**
Gépészeti Tagozat

Gépészeti tervezési segédletek II.

Kompozit szerkezetek tervezése

Dr. Bánó Imre

2015.

Magyar Mérnöki Kamara
Gépészeti Tagozat

Sorozat címe:
Gépészeti tervezési segédletek II.

Kötet címe:
Kompozit szerkezetek tervezése

Szerző:
Dr. Bánó Imre

Sorozat szerkesztője:
Dr. M. Csizmadia Béla

Készült az MMK Feladatalapú pályázatának keretében
2015

Tartalom:**Oldal**

1. Bevezetés.	4
2. A kompozit szerkezetek fogalma, fejlődésük, az új irányzatok.	5
3. A kompozitok mátrix, váz és segédanyagai.	7
4. A kompozit szerkezetek gyártásának főbb technológiái.	22
5. A kompozit szerkezetek kialakításának főbb szempontjai	36
6. Kompozit szerkezetek méretezésének alapelvei.	45
7. Kompozit anyagok és szerkezetek szilárdságtani és merevségi vizsgálatai.	53

1. Bevezetés

A kompozit szerkezetek egyre nagyobb elterjedésnek örvendenek, ugyanakkor a gépészmérnökök nagy része között nem ismertek azok az anyagtulajdonságok, korszerű technológiák, amelyek tervezésükhöz elengedhetetlenek. Mi általában az általunk homogénnek és izotrópnak tekintett fémeken „nőttünk fel”, és mindent ezekhez akarunk hasonlítani, a kompozit szerkezetek azonban ettől lényegesen eltérnek.

Ebben a segédletben megpróbálom röviden összefoglalni azokat a főbb alapelveket, amelyek ismerete ezeknek a szerkezeteknek a tervezéséhez szükségesek. Nem kívánok foglalkozni részletesen az egyes anyagokkal, ezek tulajdonságait, tényleges szilárdsági és merevségi adatait, célszerű a gyártók leírásaiból megszerezni illetve figyelembe véve a gyártás körülményeit saját magunknak meghatározni. Ezért az utolsó részben foglalkozom az ajánlott és a mindenképpen szükséges vizsgálatokkal is.

Ismertetem a legfontosabb gyártási technológiákat, mivel ezek legalább alapfokú ismerete fontos a tervező számára. Egyrészt kitér a lehetőségeit, másrészt a kompozitokra fokozottan érvényes hogy a gyártási technológia, a technológiai fegyelem, és a fizikai munkát végzők tudása és szakmai színvonala alapvetően befolyásolja az adott szerkezet szilárdságát és merevségét. Sajnos hazánkban sok helyütt tapasztalható, hogy úgy tekintenek a kompozitokra, mint amihez nem kell szakértelem, ami azután a minőség hiányában és a magas költségekben meg is nyilvánul. A kompozit technológiák általában nem olcsók, és a gyártásuk egészségre veszélyes lehet. El kell oszlatni azonban egy tévhitet. Az elkészült kompozitok, és a gyártásuk során keletkezett segédanyag hulladékok, nem minősülnek veszélyes hulladéknak.

A kompozit szerkezetek tervezése megkíván egy újfajta szemléletet. Amennyiben egy meglévő szerkezetet, vagy annak egy részét, kihasználva a kompozitok nyújtotta formai lehetőségeket, egy az egyben akarjuk kompozitból előállítani, akkor nem leszünk igazán sikeresek. Különösen vigyáznunk kell a kompozit szerkezetek sokkal nagyobb rugalmasságára és a fellépő sokkal nagyobb deformációkra. Ezeket a tulajdonságokat azonban igen jól ki is használhatjuk, például újszerű integrált rugózások megalkotásával.

A szűk terjedelem adta korlátokon belül megpróbáltam néhány jellemző megoldást is bemutatni. Példáimat és a megmutatott módszereket főleg a repülő és űrrepülő iparból vettem, hiszen a kompozit szerkezetek ezen a területen születtek meg és ezen a területen használják őket a legjobban.

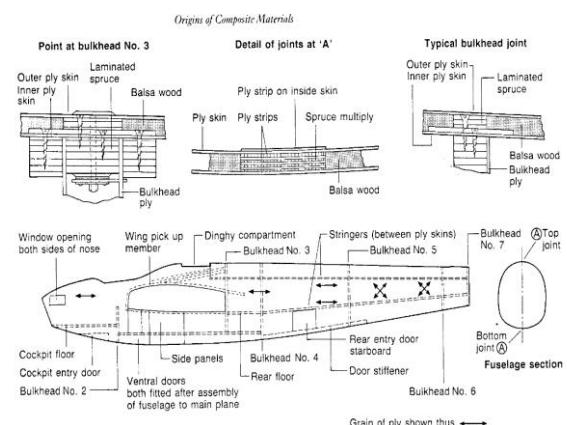
2. A kompozit szerkezetek fogalma, fejlődésük, az új irányzatok

A kompozit anyagokat a különböző fizikai jellemzőkkel bíró anyagok előnyös tulajdonságainak jobb kihasználhatósága végett hozták létre. Kompozit anyagokon legalább kétféle-, elkülöníthető anyag kompozícióját, társítását értjük, egy adott tárgyon belül. Ez a kétféle anyag feladat szerint az erősítőanyag (vázanyag, reinforcement) és a beágyazó anyag (mátrix).

A legelső kompozit anyag a múlt század első harmadában jött létre, mai napig is igen közkedvelt, a neve textilbakelit. Igen kiváló szilárdsági és villamos szigetelő tulajdonsággal rendelkezik, ezért az akkori elektromos (de nem csak az elektromos) ipar számos helyén használták. Az első igazi kompozit szerkezetek azonban jellemzően a második világháborúhoz kapcsolódóan jöttek létre, a repülőiparban. Két képet mutatnék be erről. Az elsőt a híres angol Spitfire vadászrepülőgép kísérleti törzsét láthatjuk, amit üvegszál erősítésű poliészter gyanta és papír méhsejt felhasználásával készítettek, úgy tudom mintegy hatvanas szériában.



A másik híres példa az angol De Havilland repülőgépgyár fenyőlécz, balsafa, nyír rétegelt lemez kombinációjú szendvics szerkezetű Mosquito repülőgépe, ami mai napig csodált teljesítményt nyújtott.



A világháború után került sor az első igazán „üveg” repülőgép megalkotására. Ez a német FS24 Phoenix vitorlázó repülőgép volt.



Ezt a gépet a stuttgarti egyetem repülőklubja (Akaflieg Stuttgart) fejlesztette állami támogatás mellett. A gép üvegszál poliészter kompozittal, balsafa maganyaggal, készült. Szárnyfelületének, addig még ek nem ért felületi minősége a gyakorlati aerodinamika előtt új távlatokat nyitott.

A kompozitok további fejlesztése is egyetemi Akafliegek nevéhez kötődik (Darmstadt és Braunschweig) a 70-es évekre kialakult a ma is használt lényeges technológiák többsége.

Ma a vitorlázó repülőgép ipar technológiailag a kompozit ipar „zászlóshajója”. Ezen a képen az egyik csúcs termék az ASH 30, amelyik ezer méterről több mint hatvan kilométerre tud elsiklani. Jelenleg a kompozitokat egyre szélesebb körben használják a legkülönbözőbb iparágakban.



Néhány kimagasló példát mutatunk be a következő ábrákon:



Boeing B787 „Dreamliener”, teljesen kompozit, max 333 utaslétszámú repülőgép.

A Virgin Galactic Space Shipje egy teljesen kompozit szerkezetű polgári űrhajó.



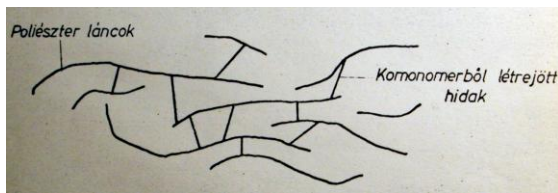
3. A kompozitok mátrix, váz és segédanyagai.

A kompozitok vázanyagaival, népszerű nevükön a „gyantákkal” nem kívánok foglalkozni, mert ez alapvetően a vegyészek feladata. Ezek kiválasztásánál, hogy melyik cég melyik gyártmányát kívánjuk használni, ki kell kérni a véleményüket. Azonban fel szeretném hívni a figyelmet arra, hogy a gyártás során nagyon kell ügyelnünk arra, hogy pontosan betartsuk a gyártó által javasoltakat. A leggyakrabban használt gyantatípusok :

- Poliészter (ortoftálsavas, izoftálsavas, tereftálsavas)
- Vinilészter (epoxi, vagy epoxi/novolak bázisú)
- Epoxi (alap, lamináló, öntő)
- Fenol-formaldehid
- Poliuretán
- Szilikon

Vannak olyan felhasználási területek (Repülő és űrrepülő ipar, hajózás stb.), amelyeknél csak a hatóságilag engedélyezett anyagokkal dolgozhatunk. A feldolgozás során, szigorúan ügyeljünk a gyári ajánlásokra. Különösen két szempontra kell gondosan ügyelnünk, az egyik az úgynevezett „fazékidő”, a másik a feldolgozási hőmérsékletek.

A fazékidő lejártával nem szabad a feldolgozást folytatni, és azt a gyantát, ami a fazékban van, ki kell dobni. Ennek az az oka, hogy ekkor már megkezdődik a gyanta „kötése”, elkezdenek kialakulni a keresztkötések. Ilyenkor a gyanta még folyósabb lesz, de ha belenyúlunk, akkor ezek a kötések nem tudnak kellőképpen kialakulni és a gyanta már nem lesz megfelelő minőségű. A fazékidő letelte után már a sablonban sem szabad a munkadarabhoz hozzányúlni. A gyanta megfolyósodása a kötés során, problémát okozhat olyan ferde felületeknél, ahol a gyanta kifolyhat az erősítő anyagok közül. Ilyenkor olyan adalékokat kell használnunk, amelyek a gyanta viszkozitását megnöveli. (vágott üvegszál, mikroballon, stb. stb.)



A kopolimerizációval létrejövő térhálós szerkezet sémája

A feldolgozási hőmérsékletre is nagyon kell vigyázni. A gyári ajánlásokat szigorúan be kell tartani. Általában a legmegfelelőbb feldolgozási hőmérséklet a $18 - 22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Problémát általában a magasabb hőmérsékletek szoktak okozni. Több helyen láttam, hogy nyári időszakokban ezért a munkát éjszaka végzik. Alacsony hőmérsékleten a gyanta nem köt rendesen (vagy egyáltalán nem), magasabb hőmérsékleten a kötés meggyorsul, a fazékidő lerövidül, és a szerkezet minősége sem lesz a megfelelő.

A kompozit szerkezet merevségét és szilárdságát a vázanyagok biztosítják. Ezek anyagai lehetnek az üvegszálak, szénszálak (karbon), bazalt szálak, aromás poliamid szálak (kevlar). A terhelés felvételekor a terhelés a nyúlások arányában oszlik meg. A következő ábrában egy konkrét adatokon alapuló összehasonlító számítást mutatok be, amely üvegszál, illetve szénszál esetében mutatja a viszonyokat. A számok magukért beszélnek.

A rugalmassági modulusok eltérésének hatása a terhelés megoszlásra:

$$a = \frac{E_{\text{erősítés}}}{E_{\text{matrix anyag}}}$$

$$b = \frac{\text{Keresztmetszet}_{\text{erősítés}}}{\text{Keresztmetszet}_{\text{matrix anyag}}}$$

$$e = \frac{E_{\text{erősítés}}}{E_{\text{matrix anyag}}}$$

$$a = b/e$$

Példa 1:

gyanta: Epoxy L 285 $E = 3\text{ GPa}$

erősítés E üveg $E = 72\text{ GPa}$

$$E_{\text{erősítés}} / E_{\text{matrix anyag}} = e = 24$$

$$\text{Felület}_{\text{erősítés}} / \text{Felület}_{\text{matrix anyag}} = 0,5$$

$$E_{\text{matrix}} / E_{\text{erősítés}} = 0,0208 = 2,08\%$$

Példa 2:

gyanta: Epoxy L 285 $E = 3\text{ GPa}$

erősítés HS grafit $E = 240\text{ GPa}$

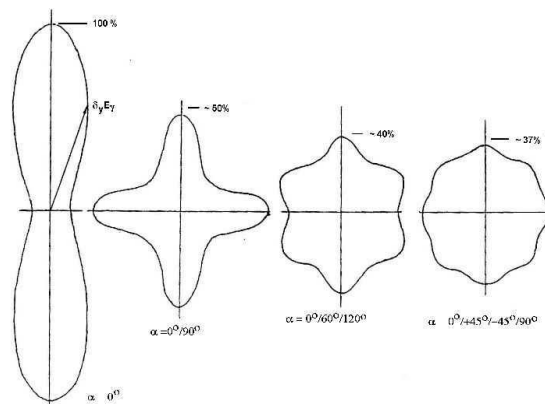
$$E_{\text{erősítés}} / E_{\text{matrix anyag}} = e = 80$$

$$\text{Felület}_{\text{erősítés}} / \text{Felület}_{\text{matrix anyag}} = 0,5$$

$$E_{\text{matrix}} / E_{\text{erősítés}} = 0,006258 = 0,63\%$$

Mivel ezek a teherhordó anyagok, szálak, ezért a belőlük készült kompozitok szilárdsági tulajdonságai nagymértékben függenek a szálirányoktól. A következő ábra ezekre mutat rá. Annyiban „csalnak” ezek az ábrák, hogy nem veszik figyelembe azt a tényt, hogy a kompozitok, a nyomást kevésbé viselik el mint a húzást, ezért ezeket a konstrukció során figyelembe kell venni. Egyébként is ajánlatos, tekintettel arra a tényre, hogy a kompozitok szilárdsági tulajdonságai erősen függenek a konkrét feldolgozási technológiától, azokat a szilárdsági és merevségi paramétereket, amelyeket a méretezés során fel kell használnunk, ne a katalógusokból vegyük, hanem a saját szakító kísérleteinkből.

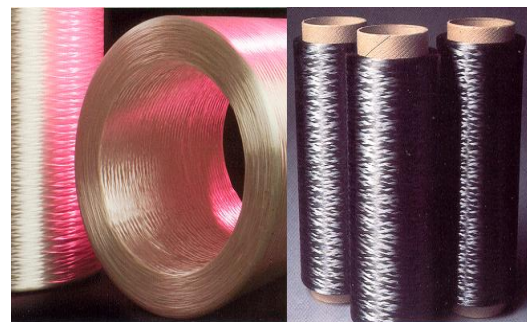
Szálerősítésű kompozit laminátok síkbeli szilárdsági tulajdonságainak változása a rétegek szálirányának függvényében



A leggyakrabban használatos vázanyag fajták a következők:

- Szálkötegek (Rovingok)

Régebben a tartóövek és hasonló feladatú részek majdnem kizárólagos szálformája volt. Ma már az UD anyagok megjelenésével már nem igen használják őket.



- Vágott szálalás üvegpaplanok

Olcsóságuk miatt, ahol minőségi követelmények nincsenek a leggyakrabban használt váz anyagok. A



belőlük készült szerkezetek nehezek, és szilárdságuk erősen megkérdőjelezhető.

- Végtelen szálú üvegpaplanok

Ugyanúgy vezeti a gyantát, mint az axiális szövetek. Erősebb lesz a laminát, mint a vágott szálal paplannal.

- Szövetek

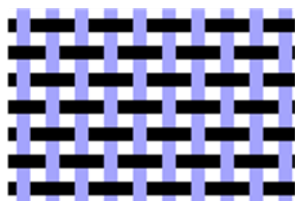
A szálakból szövött különféle szövetek a minőségi kompozit ipar legsokrétűbben felhasznált alapanyagai. A konstrukció során azonban figyelembe kell vennünk azt a tényt, hogy a szövetben a szálanyag szilárdsága kisebb, mint az egyenes szálaké. Jól tudjuk, hogy az ívben futó drótkötél szilárdsága csökken. Ugyanez érvényesül a szöveteknél is. Ezért aztán igyekeznek olyan szövés módokat alkalmazni, ahol a szálak a lehető leg egyenesebben futnak. Az alábbiakban bemutatjuk a leggyakrabban használt szövés mintákat. A felhasználás módja attól is függ, hogy milyen felületeket akarunk kialakítani.

A szöveteket készíthetjük üvegből, szénszálból, bazaltból, aromás poliamidból. Ügyelnünk kell arra, hogy ha szövés technikai okokból a szálakat írezik, akkor ezeket a szöveteket felhasználás előtt írteleníteni kell, mert különben nem fog a gyanta tapadni hozzájuk.

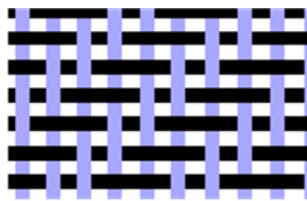
Különböző üveg vázanyagok



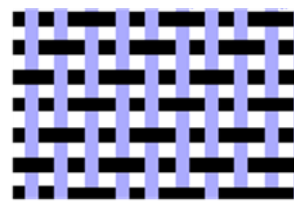
- Klasszikus szövetek:



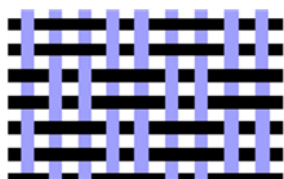
Vászonkötés



2/2 sávoly



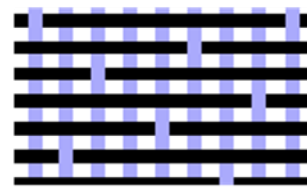
2/1 sávoly



2/2 Baskett

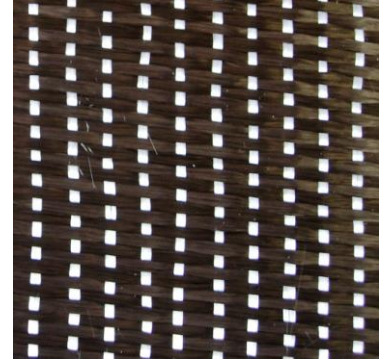
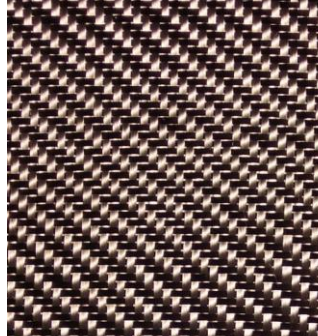
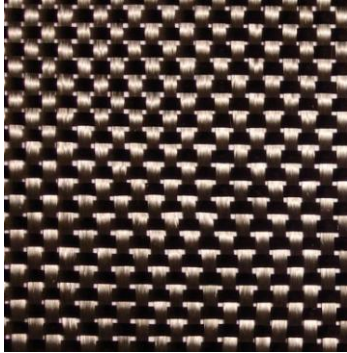


5-H szatén

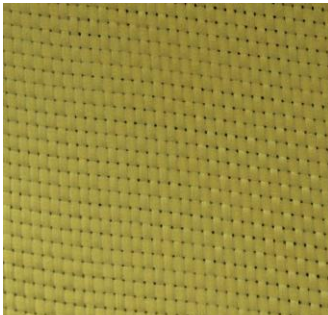


8-H szatén

Különböző karbon szövetek



Különböző aramidok (Kevlar)



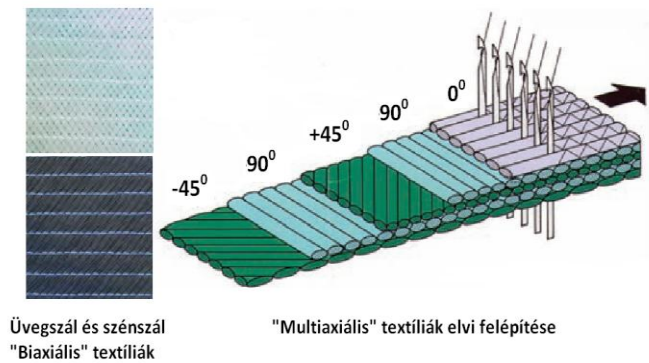
- Unidirekcionális (egyirányú) szövetek

A szövött szöveteknek a korábban említett szilárdsági hiányosságainak kiküszöbölésére találták ki az egyirányú (UD) szöveteket, ahol hiányzik a vetülékfonal, a szövet csak egyirányú szálakból áll, amelyeket fércelés vagy ragasztás tart egybe. Ezeknek meg van az az előnyük is, hogy a konstruktor teljesen szabad kezet kap a szövetfektetési tervben ahhoz, hogy az igénybevételeknek legjobban megfelelő szálirányokat és mennyiségeket alkalmazza.



- Multi axiális szövetek

Az UD szövetek tovább fejlesztése képen születtek meg a „sok-tengelyű” szövetek, amelyek különböző irányú és anyagú UD szövetek egyesítéseképpen keletkeztek. Gyakoriak a karbon – üveg, karbon – aramid, vagy éppen az üveg – karbon – aramid konstrukciók.



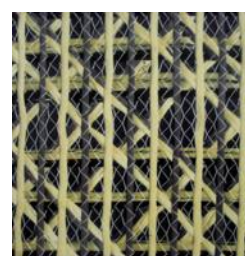
Biaxiális



Triaxiális

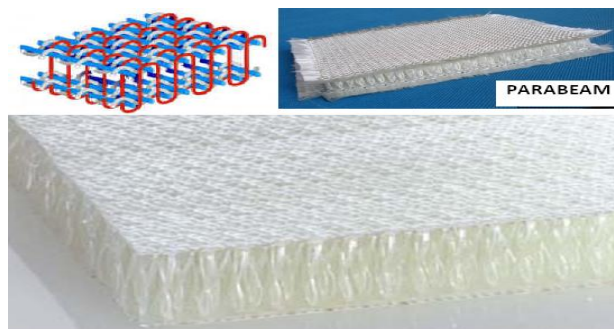


Quadraxiális

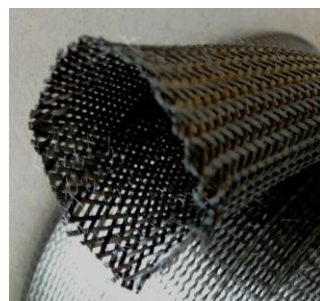


- „Térbeli” szövetek

A térbeli szöveteknek két fő fajtája van, az első az UN. Parabeam szövetek. Amikor gyantával telítjük ezeket a szöveteket, akkor „megdagadnak” és jelentős, az előzetes specifikációnak megfelelő vastagságot érnek el.



A másik fajtájúak, még sokoldalúbb felhasználást biztosítanak. Ezek az un. Csőfonatok. Ezek, szövés módjuk következtében, igen változatos alakot vehetnek fel, és sokrétű szerkezeti lehetőségeket biztosítanak.

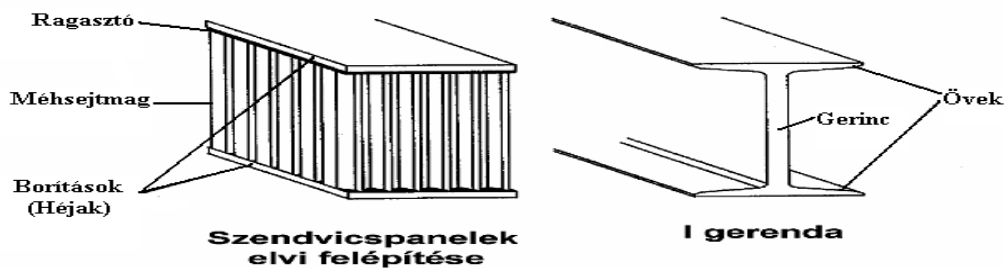


A szendvics szerkezetek.

A szendvicsszerkezetek olyan speciális szerkezeti kialakítások, amelyek adott szilárdsági jellemzőkkel rendelkező anyagokat oly módon kombinálják, hogy azok a lehető legkisebb szerkezeti súly mellett a kívánalmaknak megfelelő szerkezeti merevséget (hajlító-merevséget) biztosítsák.

A szendvicsszerkezetek funkcionálisan két fő részből épülnek fel: az alsó- és felső borításból és a közöttük lévő maganyagból. A borítólemezek (laminátok) általában ragasztással vannak a maghoz erősítve. A szendvicsszerkezetre ható terhelések hatására ébredő hajlítófeszültséget a borítások, a nyíró- és csúsztató-feszültségeket pedig a mag veszi fel. Amennyiben a teherviselő elemek bármelyike megsérül, a szendvicsszerkezet elveszíti a hajlító-merevségét!

Az alábbi ábrán egy vázlatos számítással bemutatjuk, hogy milyen előnyök származnak abból, ha megnöveljük a héjak („övek”) távolságát.



	Tömör laminát	Szendvicsmag vastagság: 1t	Szendvicsmag vastagság: 3t
Merevség	1.0	7.0	37.0
Hajlítószilárdság	1.0	3.5	9.2
Súly	1.0	1.03	1.06

Szendvics szerkezetet kialakíthatunk magunk is a megfelelő konstrukcióval, de mint szendvics paneleket vásárolhatunk a kereskedelemben is. Ezek általában igen jó minőségűek, így a saját szerkezetünk kialakításakor egy olcsó és megbízható megoldást tudunk létrehozni a használatukkal.

Hátránya a szendvics szerkezeteknek, hogy nehezen megoldhatók az erőbevezetések, és főleg pontszerű terheléseknél sérülékenyek.

A szendvics héjak anyagai azonosak a korábban tárgyaltakkal, de a maganyagokról külön meg kell emlékezni.

- Szendvics szerkezetek maganyagai

Balsafa

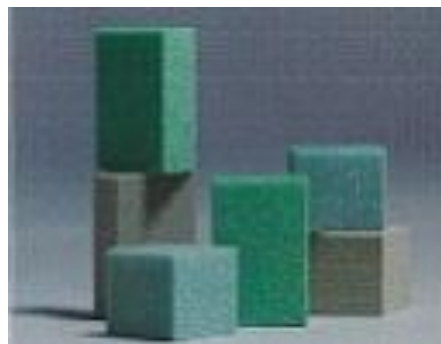
A legrégebben felhasznált szendvics maganyag, ha nincs különösebb igény a kis tömegre, ma is jól használható. Hátránya, hogy a műanyag borításon lassanként átdiffundálódó víz károsíthatja.



Keményhabok

Zártcellás keményhabok

- PVC (Polivinilklorid) Habok (AIREX; HEREX; DIVINYCELL; stb.)
- Poliuretán Habok (KAPEX)
- PMI (Polimetakrilimid) Habok (ROHACELL)
- SAN (Sztírol-akrilnitril) Habok
- Polisztirol Habok



Jelenleg a legnagyobb mennyiségben használt maganyagok. nem csak szilárdsági okokból használják őket, hanem hő és hangszigetelési célokból is.

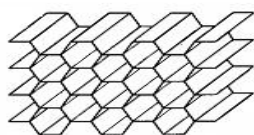
Felhasználásuk során nagyon kell ügyelni arra, hogy a habokkal a gyártás során kapcsolatba kerülő különféle anyagok, beleértve a segédanyagokat is, ne okozzanak károsodást a maganyagban. Ügyelni kell arra is, hogy a habok megfeleljenek a szilárdsági elvárásoknak, azaz a fellépő nyíróerők hatására ne roppanjanak össze, illetve, hogy a pontszerű terheléseket hogyan viselik el.

Méhsejtek

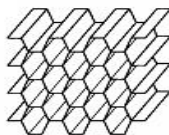
Ma a korszerű, jó minőségű és kis tömegű szendvics szerkezetek legfontosabb anyagai. Méhsejteket nem csak saját gyártású szendvicsszerkezeteknél használhatunk, hanem igen nagy mennyiségben használatosak az előre gyártott szendvicspanelek is. Ezek minősége általában jobb, mint a konstrukcióban kialakított szendvicseknek, de a leggyártott alak, ami legnagyobb részben sík, jelent bizonyos mérvű megkötöttségeket is.

A következő ábrán láthatjuk a főbb méhsejt típusokat. A speciálisabb kialakítások lehetővé teszik, hogy íves vagy szférikus felületű szendvicseket hozzunk létre.

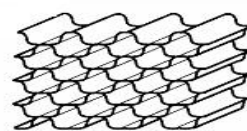
A méhsejteket általában ragasztó fólia segítségével, nyomás alatt, lehetőleg nagyobb hőmérsékleten egyesíthetjük a teherhordó borító rétegekkel. Megmunkálásuk általában a faiparban szokásos gépekkel és eljárásokkal történik. A megmunkáláshoz sokszor valamilyen töltőanyaggal telítik a méhsejtet, hogy a vékony sejtfaalak nem károsodjanak a megmunkálás során. Érdekes megoldás, hogy fém méhsejt esetén, vízzel töltik fel a méhsejttömböt, majd ezt lefagyasztják, és az így keletkezett tömböt munkálják alakra, majd a jeget egyszerűen kiolvasztják.



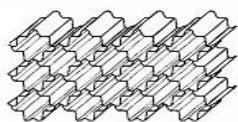
Hatszögletű méhsejt
(Hexagonal-HEX Core)



Túlnyújtott méhsejt
(Overexpanded-OX Core)



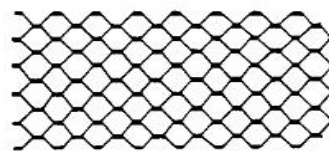
Hajlékony méhsejt
(FLEX Core)



Dupla-hajlékony méhsejt
(Double FLEX Core)



Megrősített méhsejt
(REINFORCED Core)

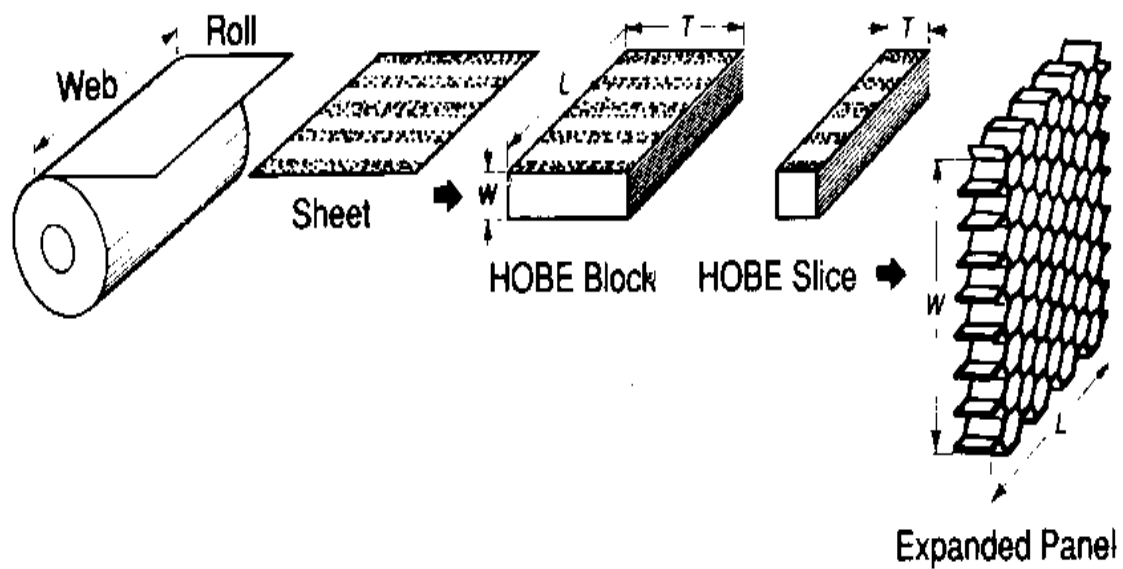


Négyszögletes méhsejt
(SQUARE, Rectangular Core)

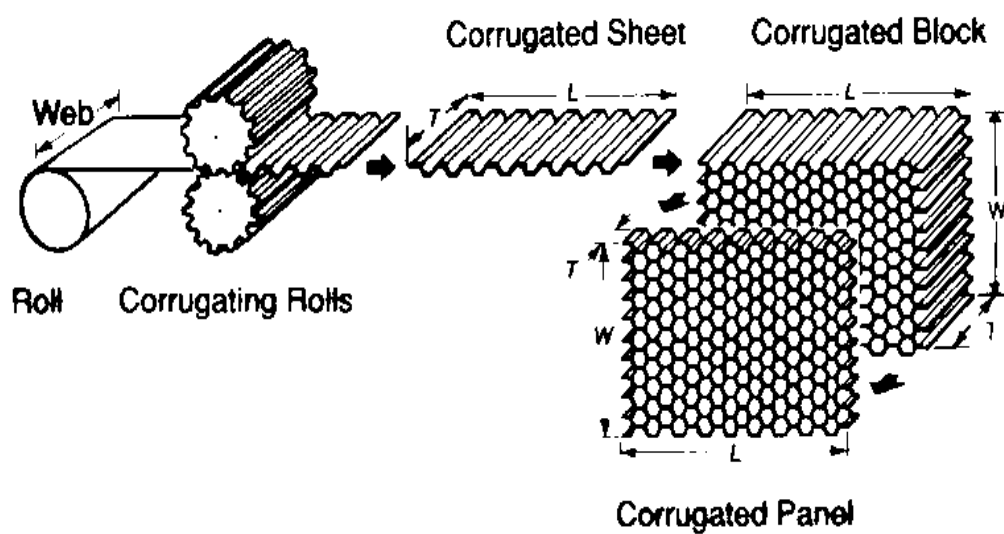


Cső méhsejt
(TUBE Core)

Expansion Process of Honeycomb Manufacture



Corrugation Process of Honeycomb Manufacture



A méhsejtek anyagai a következők lehetnek:

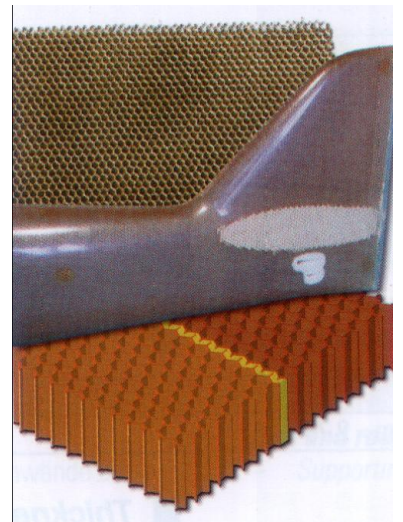
Fémes méhsejtek

- Alumínium méhsejtek
- Titán méhsejtek
- „Szuperötvözet” méhsejtek

Nemfémes méhsejtek

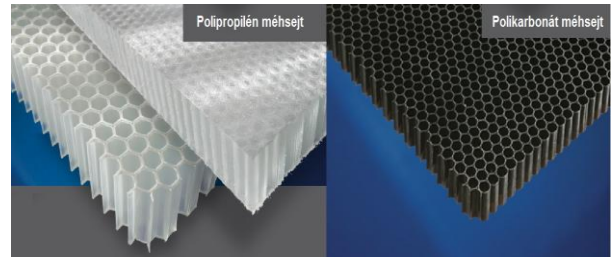
Szálerősítésű, hőre keményedő mátrixú méhsejtek

- Fenolgyantával impregnált üvegszövet-erősítésű méhsejtek
- Fenolgyantával impregnált Aramidpapír (NOMEX) erősítésű méhsejtek
- Fenolgyantával impregnált Aramidpapír (KOREX) erősítésű méhsejtek
- Fenolgyantával impregnált Aramidszövet (KEVLAR) erősítésű méhsejtek
- Fenolgyantával impregnált szénszövet-erősítésű méhsejtek
- Epoxigyantával impregnált Aramidszövet (KEVLAR) erősítésű méhsejtek
- Epoxigyantával impregnált szénszövet-erősítésű méhsejtek
- Poliimidgyantával impregnált üvegszövet-erősítésű méhsejtek
- Poliimidgyantával impregnált szénszövet-erősítésű méhsejtek



Hőre lágyuló műanyagból készült méhsejtek

- Polipropilén méhsejtek
- Polietilén méhsejtek
- Polikarbonát méhsejtek
- Poliuretán méhsejtek
- ABS (Akrilnitril-butadién-sztirol) méhsejtek



Egyéb maganyagok

- Parafa
- Háromdimenziós (térbeli) szövetek (PARABEAM: Paraglass, Paratank)
- Impregnálható nyitottcellás lágyhabok
- Impregnálható paplanok (COREMAT; LANTOR SORIC)
- Kitöltőgyanták (Potting Compounds, Syntactic Resins)

A kompozitok létrehozásához igen sok egyéb anyagot is használunk. Többek között a gyantához kevert töltőanyagokat, ragasztókat, segédanyagokat.

A töltőanyagok:

A kompozit szerkezetek ragasztására, üregkitöltésre, réskitöltésre használt folyékony gyanták viszkozitásának növelésére, sűrűségének (fajsúlyának) csökkentésére, zselésítésre és a bázisgyanta mechanikai tulajdonságainak növelésére szolgáló szilárd részecskék gyűjtőneve.

- Mikroballonok, mikroszférák
 - Üveg mikroballonok
 - Fenol mikroballonok
- Vágott-, őrölt szálanyagok
 - Vágott üvegszálak

- Vágott szénszálak
 - Őrölt pamutszálak
- Zselésítő, tixotrópizáló anyagok
- Pelyhesített-, őrölt szilikagél, kolloid szilika (Cab-O-Sil; Aerosil)

Ragasztók:

A kompozit-, illetve szendvics-szerkezetek gyártása során a több darabból álló alkatrészek végleges összeerősítésére nagyszilárdságú szerkezeti ragasztókat használnak. A repülőgépiparban a csúcsmínőségű ragasztott szerkezetek gyártása és javítása során legelterjedtebben a szilárd halmazállapotú ragasztófilmeket és ragasztóhabokat használják, de a járműipar egyéb területein (közúti-, vasúti-, és vízi járművek) valamint az energetika iparban (pl: szélérőmű lapátok) szerkezeti ragasztások céljára főként folyékony illetve paszta állagú (rendszerint két-, vagy több komponensből összekevert) ragasztók használatosak.

- Folyékony ragasztók:
- Epoxigyanta alapú ragasztók
 - Poliuretán ragasztók
 - Metakrilátok
 - Poliészter ragasztók
 - Fenol-formaldehid ragasztók
- Szilárd halmazállapotú ragasztók:
- Ragasztófilmek (epoxi, poliuretán, metakrilát)
 - Ragasztóhabok

Segédanyagok:

Olyan anyagokat takaró gyűjtőfogalom, melyek a kompozit-szerkezetek gyártása során kerülnek felhasználásra, de a késztermékbe nem épülnek be, a munkafolyamatok végén, vagy közben eltávolításra kerülnek.

- Vákumfóliák
 - Egyszer használatos fóliák (Nylon; Polipropilén, Teflon stb.)
 - Többször felhasználható fóliák (Latex; Neoprén; Szilikongumi)
- Perforált fóliák (szeparátor fóliák)
- Vákumtömítő szalagok (Vacuum bag sealants)
- Tépőszövetek (letéphető gyantafelszívó szövetek – Peel-off Bleeders)
- Felszívótextíliák (bleeders)
- Szellőztető textíliák (breathers)
- Maszkolószalagok, ragasztószalagok
- Formaleválasztók
- Zsírtalanítószer, oldószer
- Gyantavezetők, gyantaterítő hálók

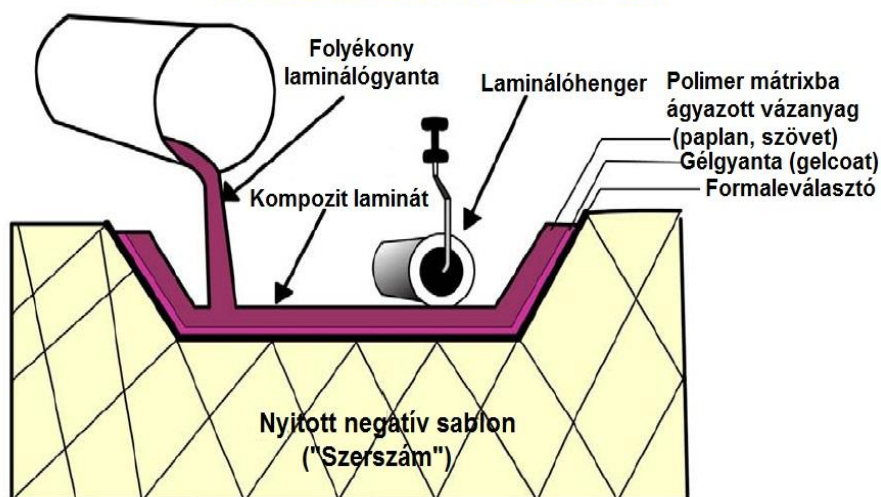
4 A kompozit szerkezetek gyártásának főbb technológiái.

Folyékony gyantával történő kézi laminálás (Wet-Layup Method)

A legrégebbi és ma is a leggyakrabban használatos gyártási eljárás. Lényegét az alábbi ábrán láthatjuk, ahol fel vannak tüntetve az egyes rétegek is. A laminálás során a legnagyobb probléma a jó gyanta vázanyag arány biztosítása. Az ideális általában a 60% vázanyag, 40% gyanta arány. Közöséges kézi laminálással ezt nem igen lehet elérni. Amennyiben a gyanta arány magasabb, akkor a kompozit tömege nagyobb lesz, ha a 40%-ot nem éri el, akkor a kompozit „száraz” lesz, és nem biztos, hogy a gyanta jól tapad a vázanyaghoz, a kompozit szilárdsága jelentősen csökkenhet.

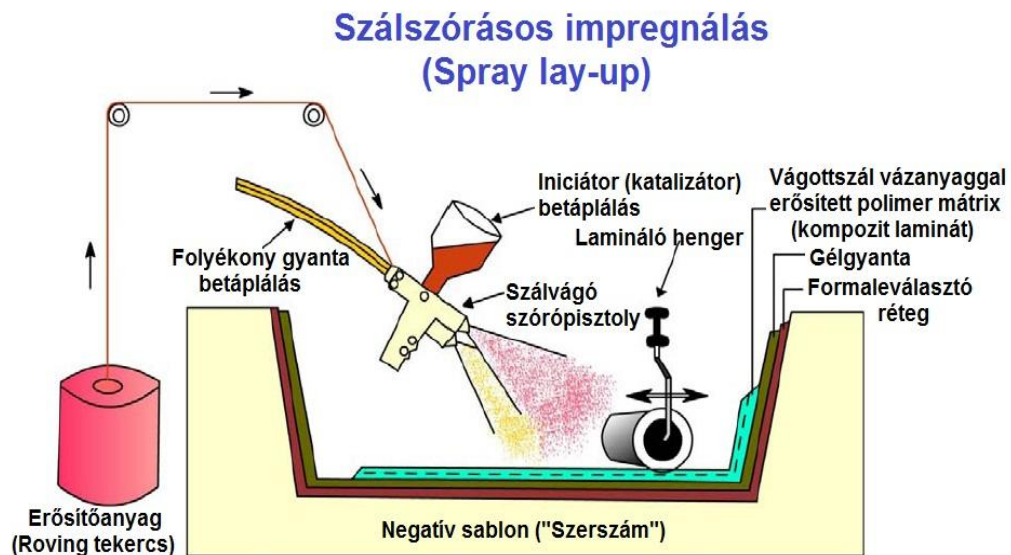
Amennyiben nem használjuk a később ismertetett vákuum, préselési eljárást, úgy az ezzel a módszerrel előállított kompozitok szilárdsága és megbízhatósága erősen megkérdőjelezhető.

Kézi Laminálás (hand lay-up)



Szálszórásos impregnálás

Tömeggyártásra kidolgozott kompozit készítési eljárás. Mivel az így készült kompozit szilárdsága erősen megkérdőjelezhető, ezért minőségi termékek előállítására nem alkalmas.



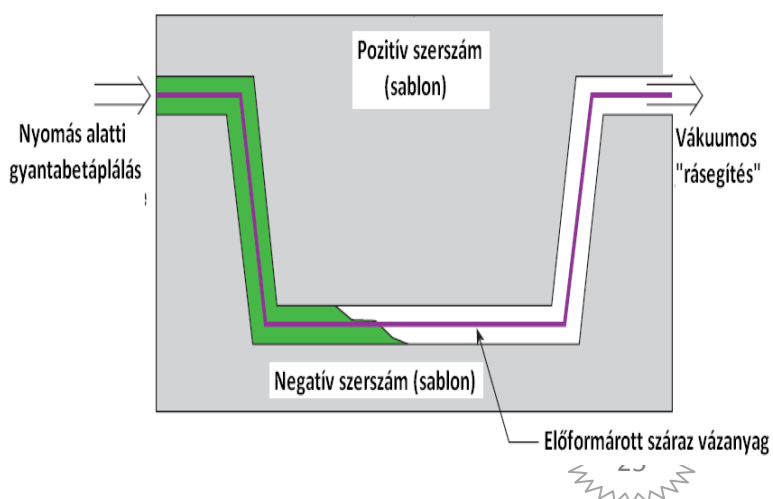
Présformázás

Ez az eljárás igen jó minőségű alkatrészeket eredményez. A magas szerszámköltség miatt, csak tömeggyártásnál igazán kifizetődő. Fűtött szerszámok használatával, és megfelelő gyanta – erősítőanyag használatával nagyszilárdságú, hőálló darabokat gyárthatunk.



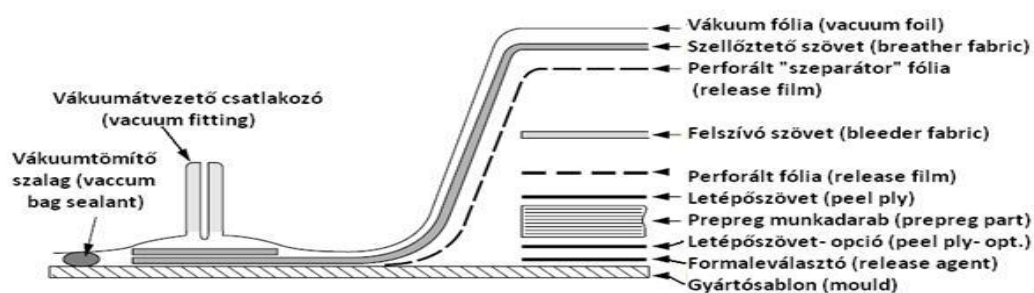
Gyanta bepréslési eljárás (RTM – Resin Transfer Moulding)

Az eljárás lényege, hogy a szerszámba szárazon behelyezett vázanyagon keresztül nyomjuk a gyantát. Szükség szerint vákuummal is „rásegíthetünk”.

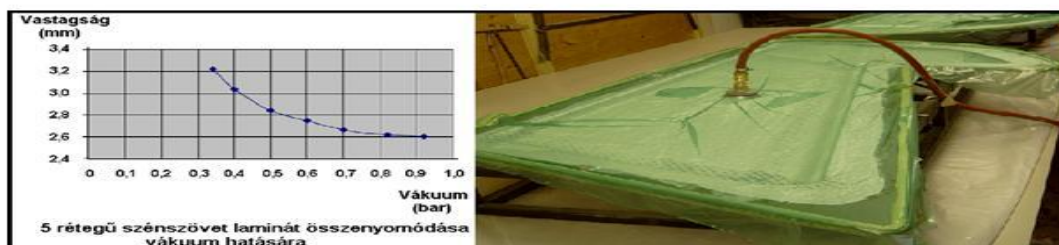


Vákuumos préselési eljárások

A jó minőségű, nagyszilárdságú kompozitok egyik legfontosabb és legelterjedtebb eljárása. Egyaránt használják úgy a kézi laminálásnál, mint a későbbiekben ismertetett gyantabeszívásos, illetve prepreg eljárások használatánál is, csak ott autoklávvval, illetve hő kamrával párosítva. Az eljárás lényege, hogy egy megfelelően kialakított és a szélein szigetelt fólia alól kiszívjuk a levegőt, és az így keletkezett vákuum összepréseli a laminátumot, kiszorítva belőle a felesleges gyantát, amelyet egy kilyukasztott fólia másik oldalán lévő felszívó szövet felvesz. Az elrendezést az alábbi ábra mutatja, mid a sima laminálás, mind a prepreg technológia esetében.



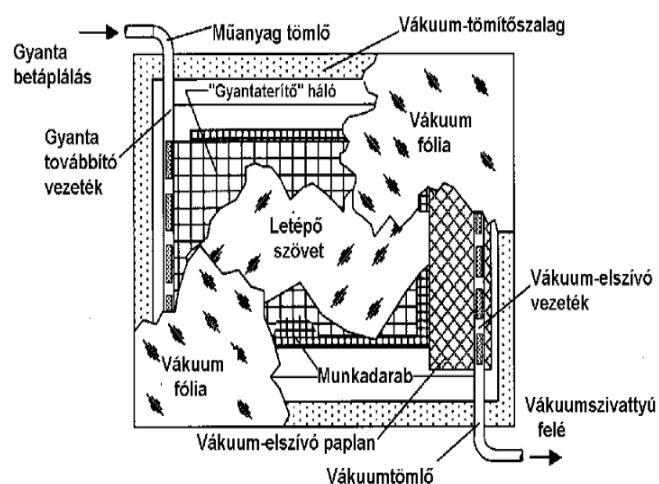
A vákuumcsomag általános felépítése

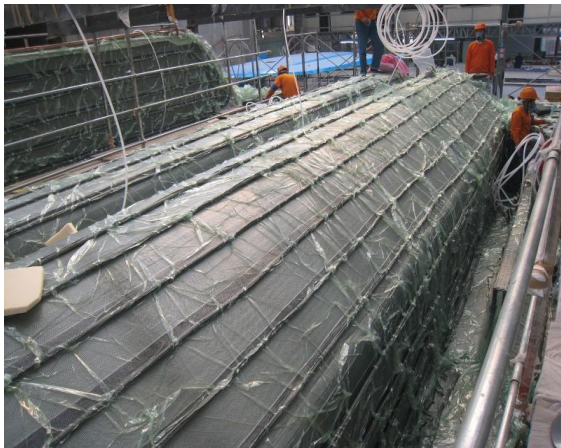


Az erősítőanyag összepréselődése és a vákuumcsomag gyakorlati megvalósítása

Vákuumos-gyantabeszívásos eljárás: (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding)

Ennek az eljárásnak a lényege, hogy a vákuum fólia alatt gyanta be és kivezető csatornákat képezünk ki, illetve gyantavezető és terítő hálókat alkalmazunk. A sablonba berétegezzük a teljes vázanyagot. A speciális gyantát (kis viszkozitású) vákuum segítségével szívjuk be a rétegek közé. Rz egyrészt egy nagyon jó minőséget biztosíthat, másrészt viszont olyan esetben amikor nagyméretű darabokat, amelyek esetleg sok rétegből állnak, a beömlési és elszívási pontok megfelelő elrendezésével egy lépésben tudjuk laminálni. Ez nem csak időnyerést jelent, hanem a sokkal jobb minőséget is. Különösen a hajóiparban kedvelt ez a módszer.





Gyanta film impregnálás (RFI – Resin Film Infusion)

Az eljárás lényege, hogy a száraz erősítőanyagot és a szilárd egykomponensű gyantát (gyantafilmet) egymásra rétegezik, majd vákuumcsomagban nyomás alatt a megolvadó gyantafilmet magába szívja az erősítőanyag, így együtt térhálósodva képeznek kompozitszerkezetet





Description: 6m Dia Monolithic Hemispherical Shell (inc. 15 discrete stiffeners)

Material: Carbon Biaxial NCF & 180°C Cure Epoxy Resin Film

Process: Resin Film Infusion (Autoclave Cure)

Figure 5: A380 Rear Pressure Bulkhead



Előimpregnált erősítő anyagok használata: (Prepreg Method)

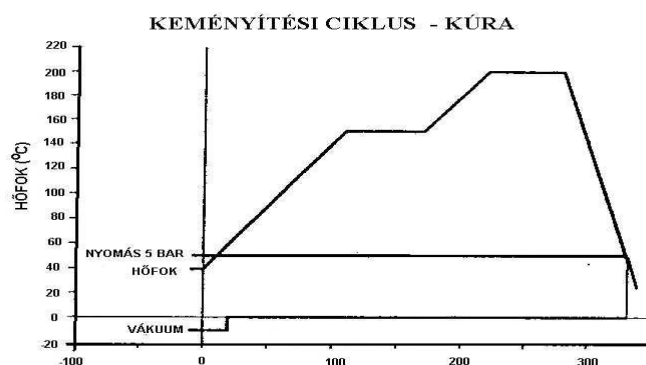
A modern csúcsmínőségű (közforgalmú és egyéb polgári célú repülőgépek, valamint a katonai repülőgépek) kompozit-szerkezeti elemeinek gyártásához legelterjedtebben alkalmazott eljárás, melyhez előre impregnált erősítőszálakat, szöveteket (Prepregs) használnak, melyeket erre szakosodott üzemekben automata gépsorokon készítenek. A szállításuk és tárolásuk általában $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra lehűtve történik. A „prepregekhez” használatos mátrixanyagok igen hosszú felhasználhatósági idővel rendelkeznek (általában $1\div 5$ hét), így igen nagyméretű munkadarabok is nagy biztonsággal és megbízható minőségben készíthetők ezzel a módszerrel. Az eljárás sokkal tisztább és megbízhatóbb, mint a nedves impregnálás, emellett jóval kisebb élőmunka ráfordítással jár, ami részben, vagy teljes egészében ellensúlyozza az alapanyag magasabb árát. A jelenleg alkalmazott „prepreg gyanták” környezeti hőmérsékleten nem térhálósíthatók, ezért minden esetben magas hőmérsékletet kell biztosítani a térhálósító kúra alatt. A legelterjedtebbek az epoxi-mátrixgyanták melyek a térhálósítás hőmérséklete alapján két csoportra oszthatók:

- Alacsony kúrahőmérsékletű prepregek

($+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti térhálósítás)

- Magas kúrahőmérsékletű prepregek

($+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+220\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti térhálósítás)



Előnyei:

- A megfelelő alakúra vágott darabok a védőfólián keresztül külön ragasztóanyag nélkül a helyükre simíthatók.
- Különösen jól tartható a gyanta/erősítőanyag arány.
- Rendkívül tiszta eljárás

Hátrányai:

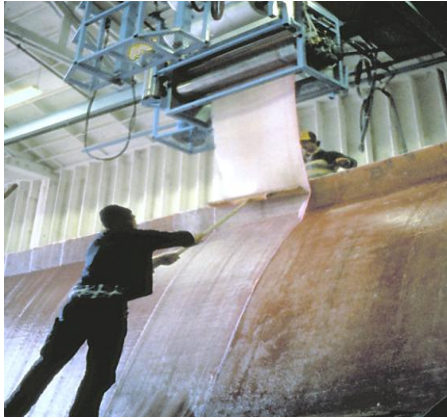
- A prepreget mélyhűtött állapotban kell tárolni.
- A térhálósítás magasabb hőmérsékleten megy végbe.



Hőkamra



Autokláv



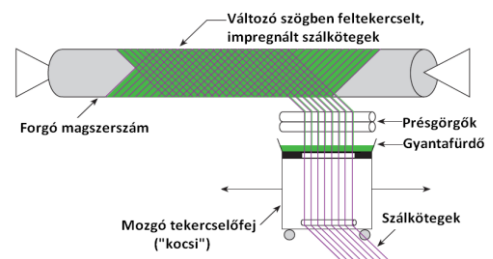
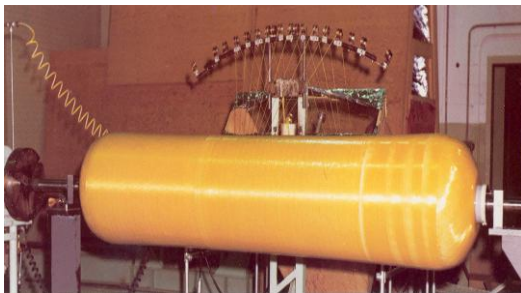
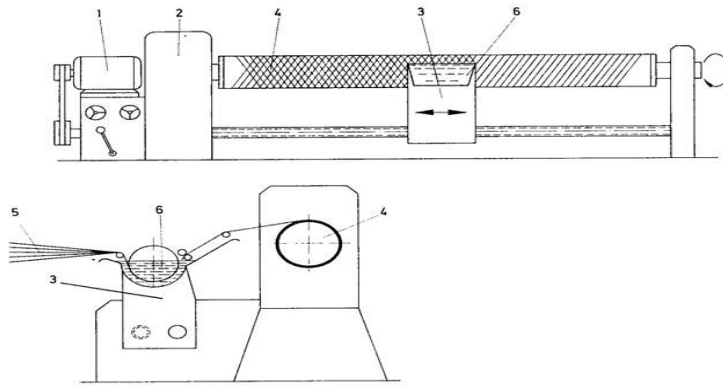
Nagyméretű munkadarabra
prepreg terítése gépel

A hőkamrákban általában vákuumot is alkalmaznak, a szorítóerő biztosítására. Különösen magas kikeményedési hőmérsékletű prepregek esetén ügyelni kell arra, hogy a sablonok, egyrészt szilárdságilag és merevségileg kibírják a hőt, másrészt pedig, hogy geometriai méretük olyan legyen, hogy az esetleges hőtágulási különbségekből ne keletkezzenek méret problémák. Itt különösen ügyelni kell a karbon alkatrészekre, tudvalevőleg a szénnek nincs számot tevő hőtágulása.

Szál-, és szalagtekercselés (Filament-, and Tape Winding)

Hengeres, vagy alakos forgástestek gyártására használt eljárás. Igen elterjedten használják hajtóanyagtartályok készítésére, de használják palackok, nyomástartó edények stb. gyártására. Az eljárás gyakorlatilag a fonalcsevéléshez hasonlít, amit a textiliparban a varrócérnak és kötőfonalak csévetestre (spulnira) történő feltekercselésére használnak. A szálköteg, vagy a szalag felcsévélése egy forgó magra történik, amely gyakran homokból

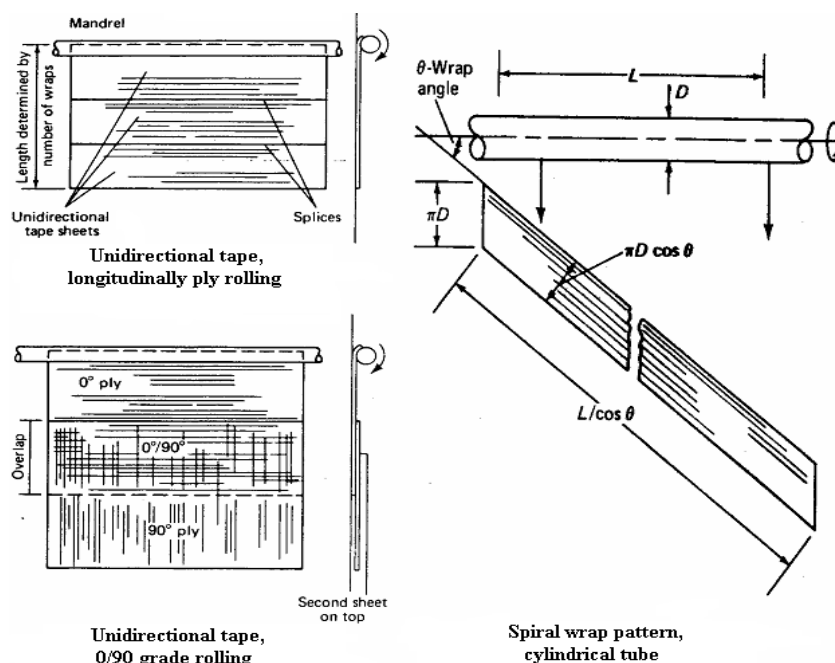
gipszből, vagy egyéb olcsó, eltávolítható maganyagból készül, melyeket a munkadarab elkészülte után roncsolással, darabokra zúzva, vízzel vagy oldószerrel kioldva, vagy kiolvasztva távolítanak el. Tartályok gyártásakor viszont gyakran fémből készült vékonyfalú” csévetestet” használnak, amelyet nem távolítanak el, hanem a tartály belső burkolatát képezi.



Csőgöngyölés: (Tube Rolling)

Igen egyszerű eljárás hengeres vagy enyhén kúpos csövek gyártására. A gyártás alapanyaga rendszerint egyirányú prepreg szalag, melyből egy sík asztalon adott hosszúságú csíkokat fektetnek egymás mellé, utána ezt egy forgatott hengeres, vagy kúpos mag köré göngyölik. Többretegű csövek gyártásakor a szükséges szalagszélességet úgy számíthatjuk ki, hogy a

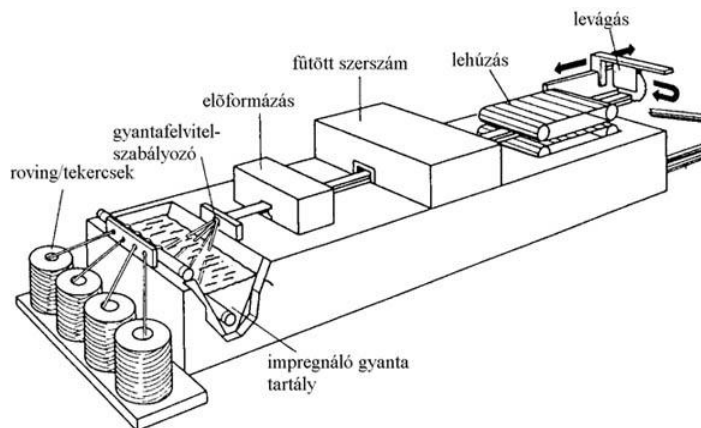
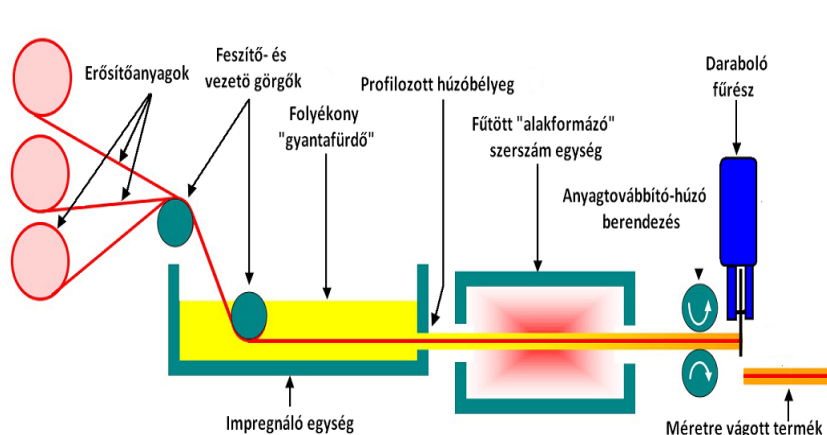
cső névleges átmérőjének területét megszorozzuk a kívánt rétegszámmal és ezen felül még egy bizonyos túlfedési értéket hozzáadunk az így kapott szorzathoz. Ezt az eljárást a palástírányú csőgöngyölésnek nevezzük. A másik eljárás a spirális csőgöngyölés, amikor a göngyölés iránya a mandrel forgástengelyére nem merőleges. Itt a szalag egy csavarmenethez hasonlóan egy adott emelkedési szögben van a csévetestre (magra, mandrelre) fölgöngyölve. Több réteg esetén a göngyölési művelet forgásiránya rétegenként változik és az így gyártott kompozit cső csavarási igénybevételek felvételére is alkalmas. A csőgöngyöléshez általában acélból készült csévetesteket (magokat, „mandrel”-eket) használnak, melyek felülete hőkezelve, polírozva, esetleg keménykrómozva is van, a könnyebb eltávolíthatóság végett. A felgöngyölt prepreg köré celofánból, polipropilénből, vagy poli-vinilfluoridból készült fóliát csévélnék előfeszítéssel, amely a prepreg gyanta térhálósodása alatt biztosítja a kellő felületi nyomást az által, hogy hőhatásnak kitéve zsugorodik. A gyanta megszilárdulása után a magot kihúzzák a munkadarabból, amelyet szükség szerint csiszolnak, políroznak és védőbevonattal látnak el. Ügyelni kell arra, hogy ha a cső csak hosszirányú szálakat tartalmaz akkor nem viseli el a csvarást.



Pultrúzió: (szálhúzásos impregnálás)

Ez egy folyamatos gyártási mód melyet állandó keresztmetszetű tömör rúd-, vagy profilanyagok előállítására használnak. Az alkalmazott erősítőszál: roving, szövet, „kéttengelyű” (biax) szövet, vagy sokirányú paplan a kívánalmaknak megfelelően. Ha nagy tengelyirányú húzószilárdság szükséges akkor rovingot vagy egyirányú szalagot használnak,

ha pedig a várható igénybevétel összetett akkor vagy a kevert szálirányú paplant, vagy a paplan és az egyirányú szál kombinációját alkalmazzák. Az eljárás lényege az, hogy az előzőleg gyantafürdőben átitatott erősítőszál a húzóbélyegbe kerül, amely a kívánt profilúra alakítja és a fűtött húzóbélyeg hatására a mátrixgyanta térhálósodva kerül ki a bélyegből. Ezzel a módszerrel hasonló profilok állíthatók elő, mint az alumínium, vagy PVC extrudálásával. A profilhúzott kompozit-anyagok szakítószilárdsága az erősítőszál fajtájától és a száliránytól függően az acélok és az ötvöztött alumínium szakítószilárdsága között van (150-280 MPa), ugyanakkor a fajsúlyuk csak 1,3 -2,0 kg/dm³, tehát azonos szilárdság biztosítása mellett lényeges súlycsökkentés valósítható meg általuk. Ezzel az eljárással készült szénszál-erősítésű „I” szelvényű kompozit padlógerendák vannak a BOEING B777 utasterében és az AIRBUS A380 utaster felső szintjén beépítve.

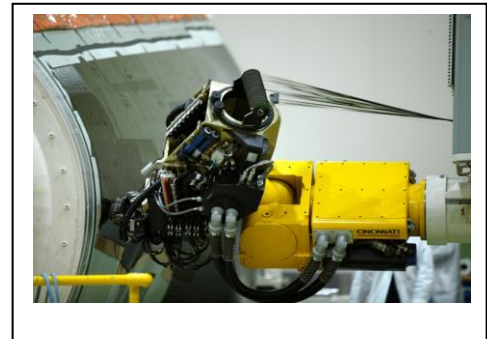




Automatizált Szál fektetés (AFP Automated Fiber Placement,)

Számítógép vezérlésű, hőre lágyuló-, vagy hőre keményedő mátrixanyaggal impregnált szálakat használó, ipari robotok által végzett gyártási eljárás. A robotkarral mozgatott terítőfej több csévetestről göngyöli le a prepreg szálkötegeket, melyeket egyenletesen szétterítve a pozitív szerszám felületére fektet és présel a betáplált program szerinti rétegszámban és irányokban. A hőre keményedő mátrixgyantával impregnált

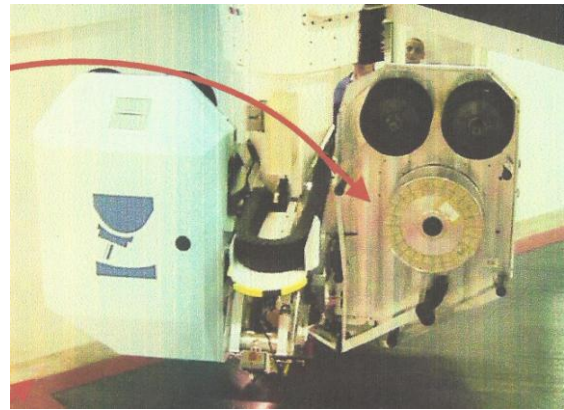
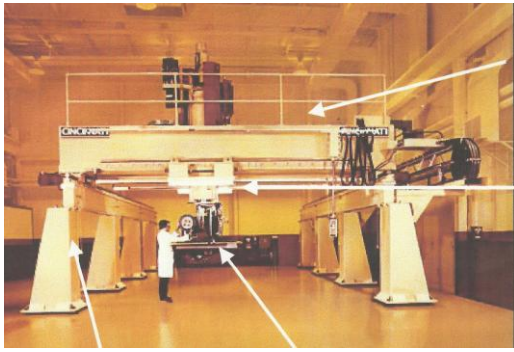
erősítőszálakból készített munkadarabok térhálósítása rendszerint vákuumcsomagban, autoklávban történik. A hőre lágyuló mátrixokat a terítőfejre szerelt helyi hőforrással (rendszerint lézerrel) olvasztja meg a berendezés, amely azonnal megszilárdul, amint a présgörgő a szerszám felületére simítja.



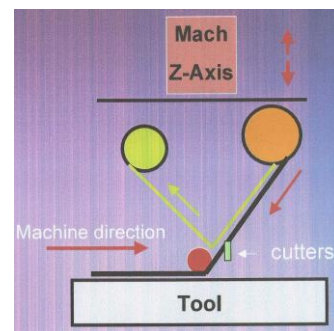
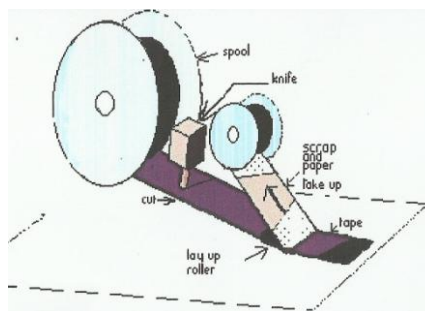
tetés (ATL Automa



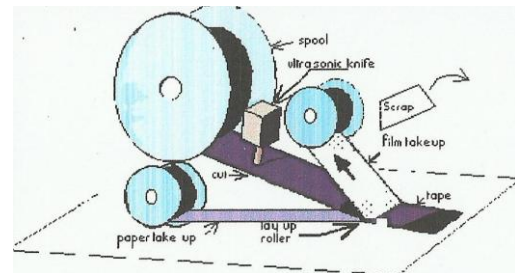
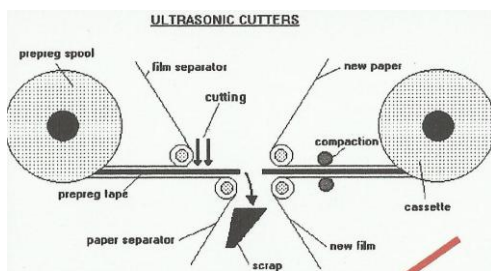
Számítógép vezérelt berendezéssel UD pre a kívánt vastagságban és irányokban sokkal gyorsabban és pontosabban, mint a kézzel végzett prepreg laminálás, amely költség-csökkenést eredményez. Térhálósítása szintén autoklávban zajlik.



Egy réteg szövet fektetése



Két réteg szövet fektetése

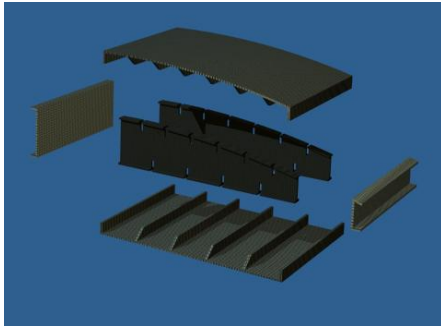


5. A kompozit szerkezetek kialakításának főbb szempontjai

Kompozit szerkezetek tervezésénél először is vegyük számba azokat a terhelési, időjárási és egyéb követelményeket, amelyeket az elkészült szerkezettel szemben támasztani kívánunk. Másodszor derítsük fel azokat a technológiai lehetőségeket, amelyek rendelkezésünkre

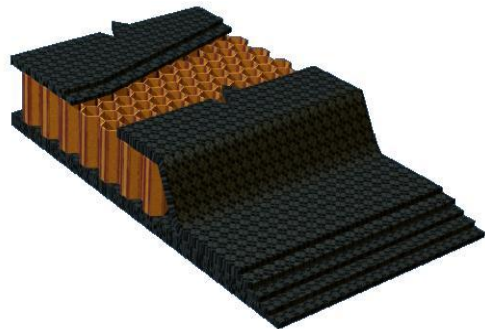
állnak. Harmadszor pedig nézzük meg, hogy az elkészítendő darab milyen költségeket visel el. Negyedszer pedig becsüljük meg, hogy a kérdéses alkatrészről, darabból mekkora sorozatra számíthatunk. Ezek után tudunk dönteni arról, hogy milyen technológiával, és milyen szerkezettel tudjuk kielégíteni az előbbi szempontokat.

A kompozit szerkezeteknek két fő fajtája van. A tömör-monolitikus szerkezetek, és a Szendvics szerkezetek. Az alábbi két ábra szemlélteti ezeket.



Szendvicsszerkezetű szerkezeti darab részlete.

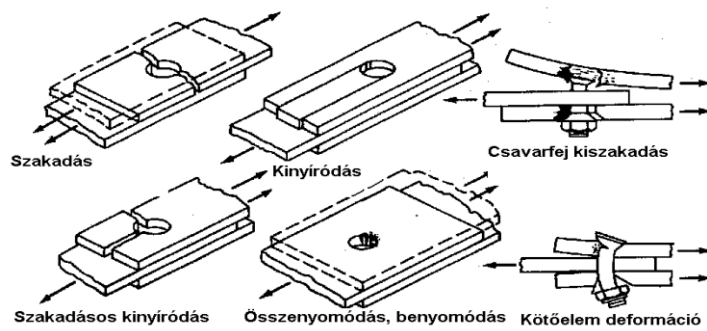
Monolitikus darabokból épült repülőgép szárny részlete.



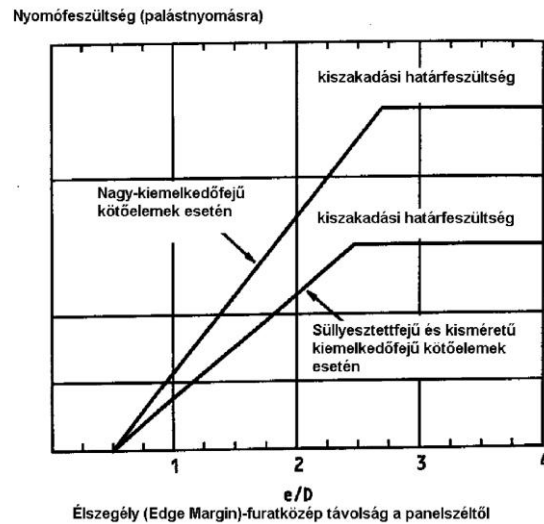
Mivel kompozit technológiával igen nagy darabokat is elő tudunk állítani, ezért célszerű megnézni a szállítási, raktározási, műhelymagyság viszonyokat, és ezek függvényében döntünk el, hogy hogyan bontjuk fel a kérdéses szerkezetet szerelési egységekre. Mivel a kompozit „nem szereti” a koncentrált terheléseket, ezért törekedjünk mennél nagyobb darabok építésére. A kötéseknel pedig részesítsük előnyben a nem bontható ragasztást. Törekedjünk szerkezethez illő anyag, anyaghoz illő szerkezet megvalósítására.

Az első probléma, amivel találkozunk a palástnyomás problémája. Palástnyomást a kompozit szerkezet nem visel el, ezért ha nem tudjuk elkerülni a koncentrált erőbevezetéseket, akkor rendszerint betéteket kell alkalmaznunk. Különösen ügyeljünk arra, hogy szegecselés helyett csavarkötést használjunk, mert a kompozit kikeményedett matrix anyaga a szegecselési erők hatására többnyire károsodik.

Az alábbi ábrán bemutatom azokat a károsodási módokat amelyek felléphetnek.



A következő diagram mutatja, hogy a kompozit lemezek szélétől milyen távolságra célszerű furatot elhelyezni. Tudjuk, hogy fémek esetében ez általában 1D.

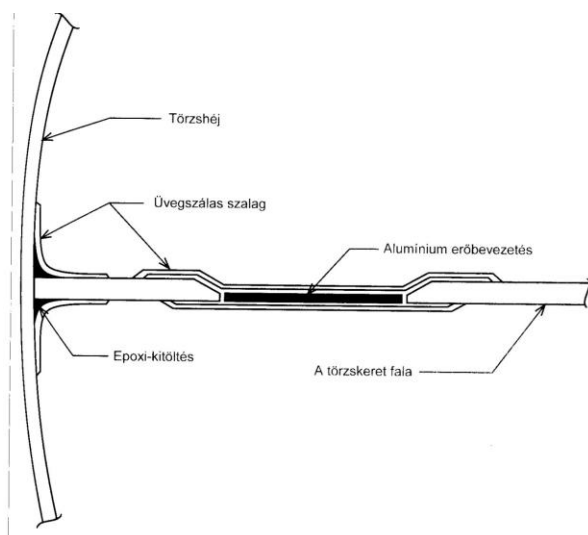


Általános gyakorlat, hogy csapok, csavarok bekötésénél egy palástnyomásra nagyobb terhelhetőségű anyagot laminálunk be. Ilyen anyag lehet akár egy könnyűfém tömb, vagy egy keményfa betét. Fa esetében ügyelni kell arra, hogy a műanyagon esetleg átdiffundálódó nedvesség a fát idővel károsíthatja.

A következő képen a Shark kétmotoros repülőgép szárnyának bekötését láthatjuk, ahol a több tonnát átvivő csapok egy a szerkezetbe belaminált, 8 mm-es textílbakelit lemezbe erősített nagyszilárdságú alumínium perselybe csatlakoznak.



A következő képeken néhány erő bevezetési példát mutatunk be.

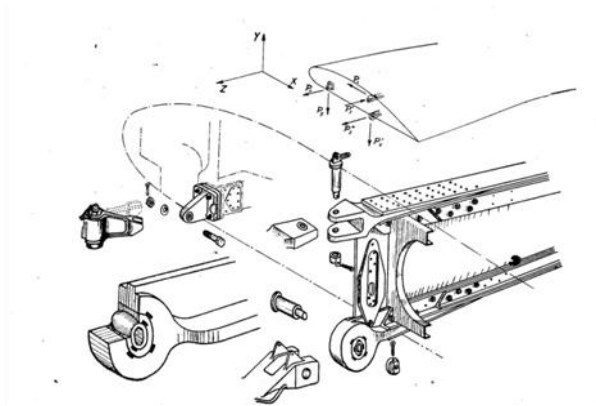


A Pulsár repülőgép szárny bekötése



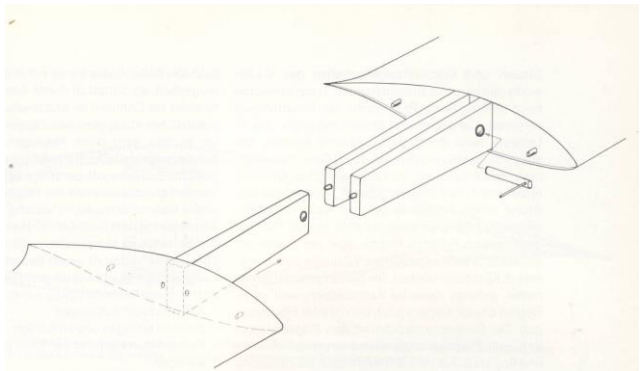
A Shark repülőgép különböző erőbevezetései.

Az igyekezet, hogy a koncentrált erőket csökkentsük, újszerű szerkezeti megoldásokra vezetett. Az alábbiakban bemutatunk erre egy klasszikus példát. A kar növelésével a támaszerőket jelentősen csökkenteni lehetett.

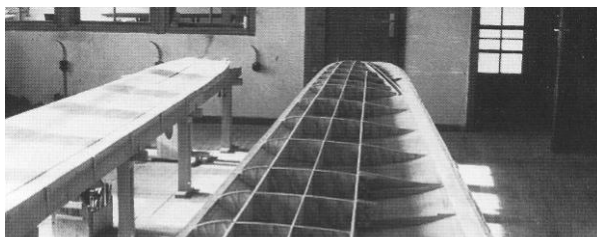


Hagyományos fémépítésű repülőgép szárnyának bekötése

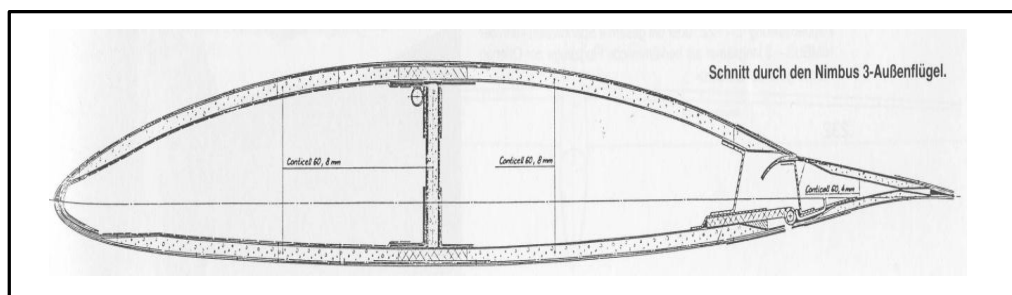
Kompozit építésű repülőgép szárnyának bekötése



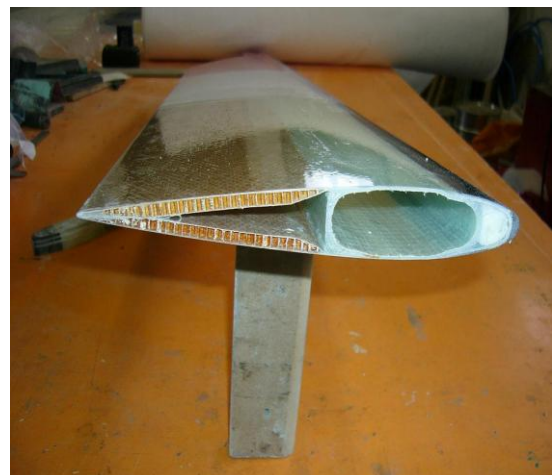
A továbbiakban példákat adunk a kompozit szerkezeti megoldásokra. Elsőnek az F52 az első teljesen üvegszál – polisztirolgyanta - balsafa kompozit repülőgép (1954) szárnyának szerkezete.



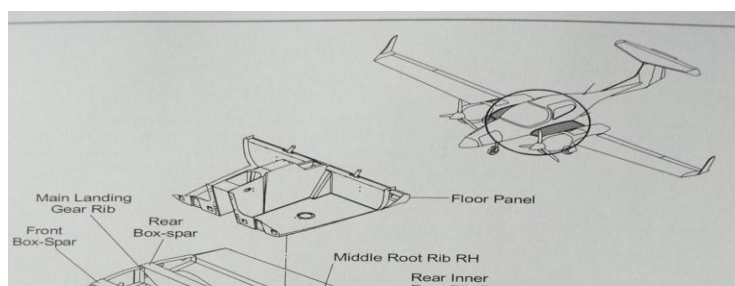
A szendvicsszerkezetek fejlődésével lehetővé vált a szárnyba épített merevítések számának jelentős csökkentése, mivel a szendvics héj saját merevsége elegendő volt. A következő ábrán láthatjuk egy mai korszerű repülőgép szárnyának keresztmetszetét.



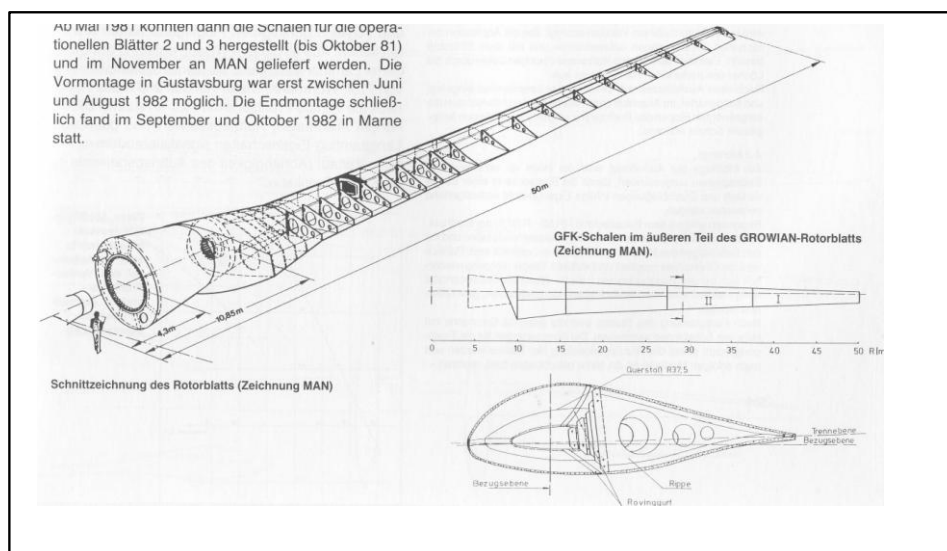
Itt pedig egy teljesen kompozit, hazai építésű helikopterlapát szerkezetét láthatjuk



Bemutatjuk a D 42 kétmotoros kompozit repülőgép szárny középrészét, a kompozit motorággal egybeépítve.



A mai szélérőművek lapátjait is csak kompozitból lehet előállítani.



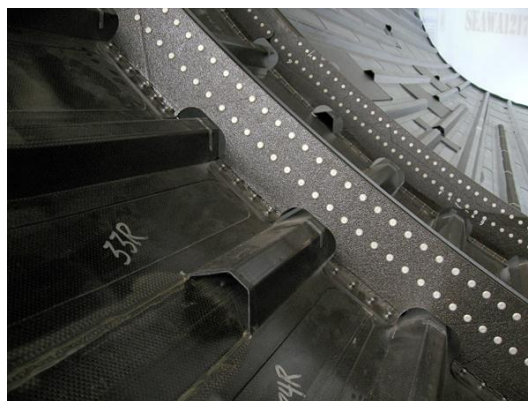
Az
bc
ra;



liner
zskere
nak.

könlatozza, hogy a gyártás nem egy helyen történik, tehát a számlási könlatozasokat is figyelembe kellett venni.





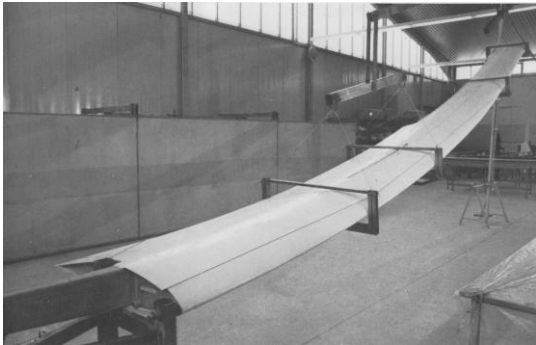
Az alábbi képeken két egyedi – kis szériás repülőgéptörzset mutatunk be. Az egyik a B-10 Amphibia törzse, a másik a Halley Kft Apolló Classic törzse. Az előbbin láthatjuk azt a formagazdagsági lehetőséget, amelyet csak ez a technológia tud biztosítani. Mindkét törzs kézi laminálással készült, koremat szalagokkal történő merevítés mellett.



Apolló Classic törzs.

B-10 Amphibia törzse.

A kompozit szerkezetek deformációi lényegesen nagyobbak az eddig megszokottaktól. Ez számos problémát jelenthet. Az alábbi képeken bemutatjuk az Astir vitorlázógép, és a B787 szárnyterhelési vizsgálatáról készült képeket.



Astir



B 787

Ezt a nagymértékű alakváltozást a konstrukció során figyelembe kell vennünk. A következő hatásokra kell elsősorban figyelni:

- ☐ Az alakváltozás hatása a működésre
- ☐ Az alakváltozás hatása a terhelésekre

- ☐ Az alakváltozás hatása a szilárdságra
- ☐ Az építés és szerelés közbeni alakváltozás
- ☐ A szállítás közbeni alakváltozás

Azonban ezt a nagymértékű deformációt ki is tudjuk használni. A következő néhány képen bemutatunk néhány példát arra, hogyan lehet repülőgépek futóműveinél egyesíteni a teherhordó és a rugózó elemeket.

Hagyományos régi futómű.



Kompozit futóművek



Corvus Racer



Pipistrel

6. Kompozit szerkezetek méretezésének alapelvei.

Mivel a kompozit szerkezetek, nevüknek megfelelően, több rendszerint igen különböző tulajdonságú anyagokból állnak össze, ezért a méretezés során külön, külön is figyelembe kell vennünk az egyes összetevőkre ható hatásokat. Megkülönböztethetünk matrix vagy támasztó, szál vagy erősítő, illetve váz vagy maganyagokat. Ezek a különböző terheléseket különböző módon viselik. Az esetek többségében feltételezhetjük, hogy bizonyos terheléseket, pld húzás, csak bizonyos összetevők viselnek, mivel az egyes anyagok rugalmassága nagyságrendekkel eltér egymástól. Vizsgálnunk kell ugyanakkor, hogy az egyes összetevők kapcsolata megfelelő e. A kompozit szerkezetek leggyakoribb tönkremenetele az úgy nevezet delaminalizálódás, vagy „kifehéredés”, amikor a vázanyag elválk az erősítő anyagtól. Jellemző, hogy ezeknek az anyagoknak a tulajdonságai az általunk megszokottnál sokkal jobban függenek a gyártási technológiától. Ebből az következik, hogy nem hagyatkozhatunk csak a katalógus adatokra, vagy mások kutatási eredményeire, hanem az előzetes méretezésnél a konkrét gyártási körülmények között előállított próbatestek vizsgálatára is szükség van, illetve bonyolultabb szerkezeteknél, utólagos terhelési illetve törőkísérleteket kell végeznünk. Erről részletesebben a következő részben lesz szó.

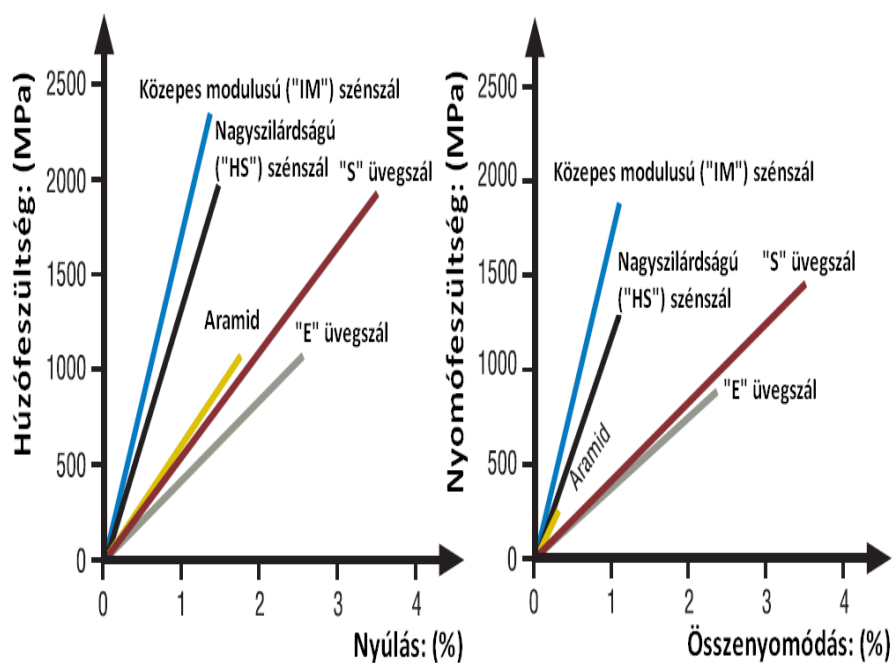
Megfelelő igénybevételi modellt kell kialakítanunk. Itt felmerül a terhelések kérdése. Vannak területek, ahol a méretezési terheléseket előírások vagy szabványok meghatározzák (hajózás, repülés, stb.), ahol azonban nem, ott saját magunknak kell ezeket megválasztani. Ennek során nem csak a józan ész által meghatározott ”üzemi” terhelésekre kell figyelemmel lenni, hanem a szerelési terheléseket, a szállítási terheléseket, az ún. megfogási terheléseket és az időjárás okozta terheléseket is. Itt jelentkezik a biztonsági tényező kérdésére is. Gillemot professzor mondta, hogy „a biztonsági tényező kifejezi a mérnök bizonytalanságát”. A kompozit szerkezeteknél a tényleges biztonsági tényező nagyobb, mint amit eddig megszoktunk. Éppen ezért szükséges a kész szerkezeteket megfelelő szilárdsági ellenőrző terheléseknek alávetni. A csak virtuális szimuláció nem elegendő, ezeket minden esetben fizikai kísérletekkel kell verifikálni. Ezzel nem csak a saját számításainkat ellenőrizzük, hanem a végzett munka minőségét is.

Nagyon fontos, hogy csak ellenőrzött szilárdsági adatokból dolgozzunk. A katalógus adatok illetve az irodalomban található adatok jellemzőek lehetnek ugyan, de konkrét méretezésekre nem alkalmasak. Fontos hogy megfelelő szövetfektetési tervet készítsünk, és ennek végrehajtását gondosan ellenőrizzük. Ma már egyre inkább elterjed, hogy a klasszikus szövetek helyett UD szövetekből alakítjuk ki a laminátot, ami egyrészt nagyobb szilárdságot, másrészt pedig azt jelenti, hogy a jobban tudunk alkalmazkodni a tényleges igényekhez.

Hogyan is méretezzünk?

Komoly probléma, hogy a húzó és nyomószilárdság jelentősen eltérő. A következő táblázatban illetve diagramban erre találunk tájékoztató adatokat.

	Vizsgálat típusa	Mechanikai paraméter	Átlag	Szórás	Min.	Max.
1.	Szakító vizsgálat ASTM D3039	σ_{hl} [MPa]	1807	60,5	1737	1876
2.		E_{hl} [GPa]	144	-	-	-
3.	Nyomó vizsgálat ASTM D3410	σ_{nyl} [MPa]	773	32,1	730	814
4.		E_{nyl} [GPa]	143	-	-	-
5.	Nyíró vizsgálat	τ_{rk}^* [MPa]	47	4,7	43	54
6.		G_{13}^{**} [GPa]	2,06	0,7	1,98	2,15

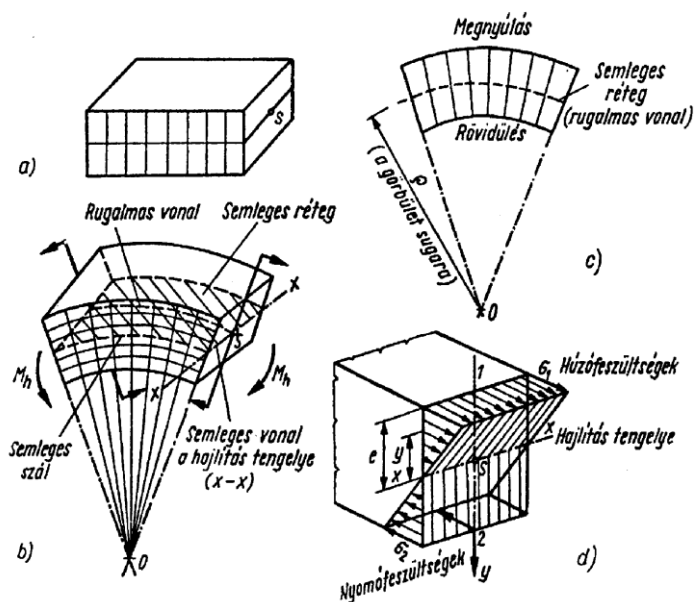


Láthatjuk, hogy a húzó és nyomószilárdság eltérése jelentős a

$$\sigma_{\text{nyomó}} / \sigma_{\text{húzó}} = 0,8 - 0,5 (0,3?)$$

Komoly probléma, hogy a nyomószilárdság mérése kompozitoknál eléggé problematikus, erről, a következő részben részletesebben is beszélünk. A Nyomóterhelés hatására bekövetkező összeroppanás veszélyét, különösen Kevlar esetén figyelembe kell venni.

Az aramid-epoxi („Kevlar”-epoxi) laminát „aszimmetrikus” viselkedése hajlító-igénybevétel hatására: a nyomott oldal a húzott oldali terhelési maximumnak $\sim 30 \div 35$ %-ánál „összeroppan”!

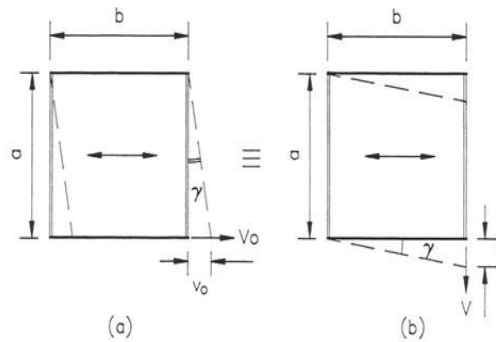


A hajlítóigénybevétel értelmezése

Ez annyit jelent, hogy a nyomóoldalon beépített szövetmennyiséget jelentősen növelni kell.

Igen gyakran előfordul, hogy nem megfelelően kezelik a nyíróerő problémáját. Nézzük meg, hogy ez mit jelent. Az alábbi ábrákon bemutatjuk, hogy egy nyírt lemez (tartógerinc, csavaró doboz borítás, stb,) deformációja milyen és, hogy ebből milyen szálfektetési irány következik, mivel a szálak csak húzóerőket tudnak felvenni.

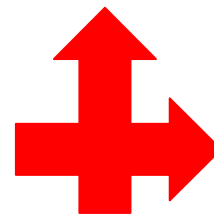
Deformáció nyíráskor



A helyes szálirány a következő



Sokszor ezt a rossz szálirányt alkalmazzák.



Az egyik fő probléma, hogy a nyírófeszültség fogalma (τ) nehezen használható, mivel nem ismerjük a működő szálkeresztmetszetet. Erre megoldás a „nyírófolyam”, fogalmának bevezetése.

$$t = \tau v$$

Ahol	t	= nyírófolyam	(N/m)
	τ	= nyíró feszültség	(N/m ²)
	v	= lemezvastagság	(m)

Sík gerincű tartó

$$t = Q/h$$

$$Q = \text{nyíró erő} \quad (\text{N})$$

$$h = \text{gerincmagasság} \quad (\text{m})$$

h



Q

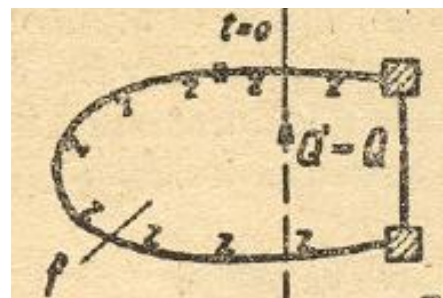


Csavart doboz

$$M_{cs} = \text{csavaró nyomaték} \quad (\text{mN})$$

$$F = \text{doboz keresztmetszet} \quad (\text{m}^2)$$

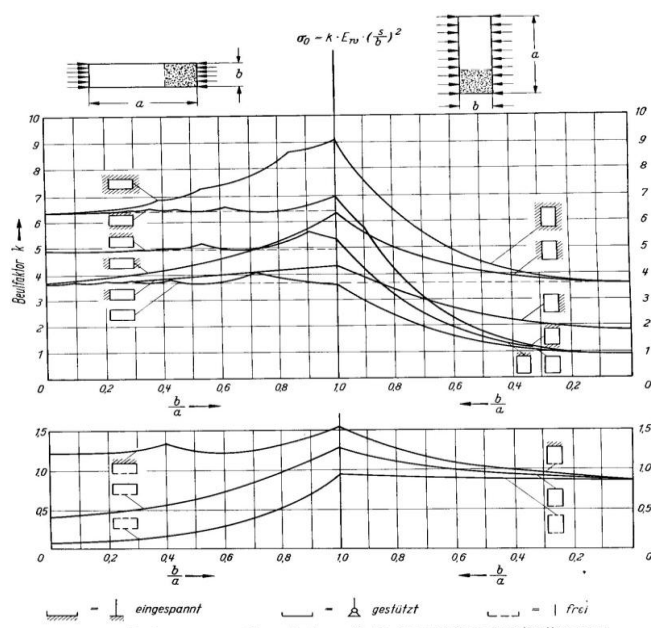
$$t = M_{cs}/2F \quad (\text{Bredt képlet})$$

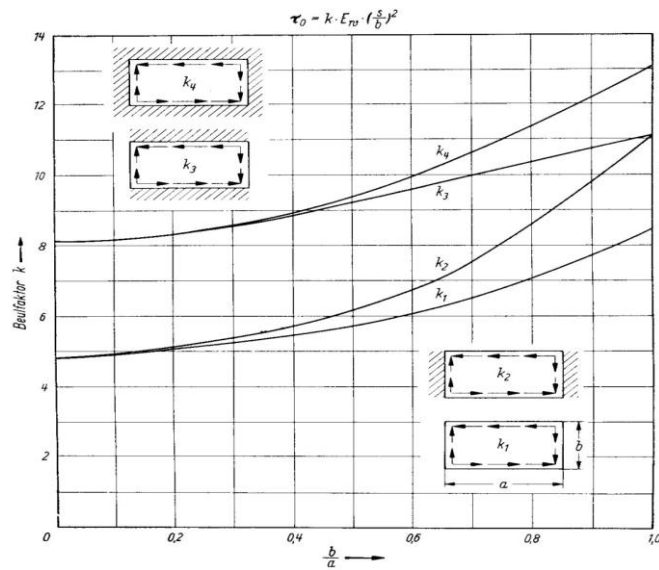


Figyelembe kell vennünk a kompozit nagyobb rugalmasságát is, ezért a stabilitási, kihajlási, problémáknak nagyobb a jelentősége, mint azt eddig megszoktuk. Mik ezek a stabilitási problémák

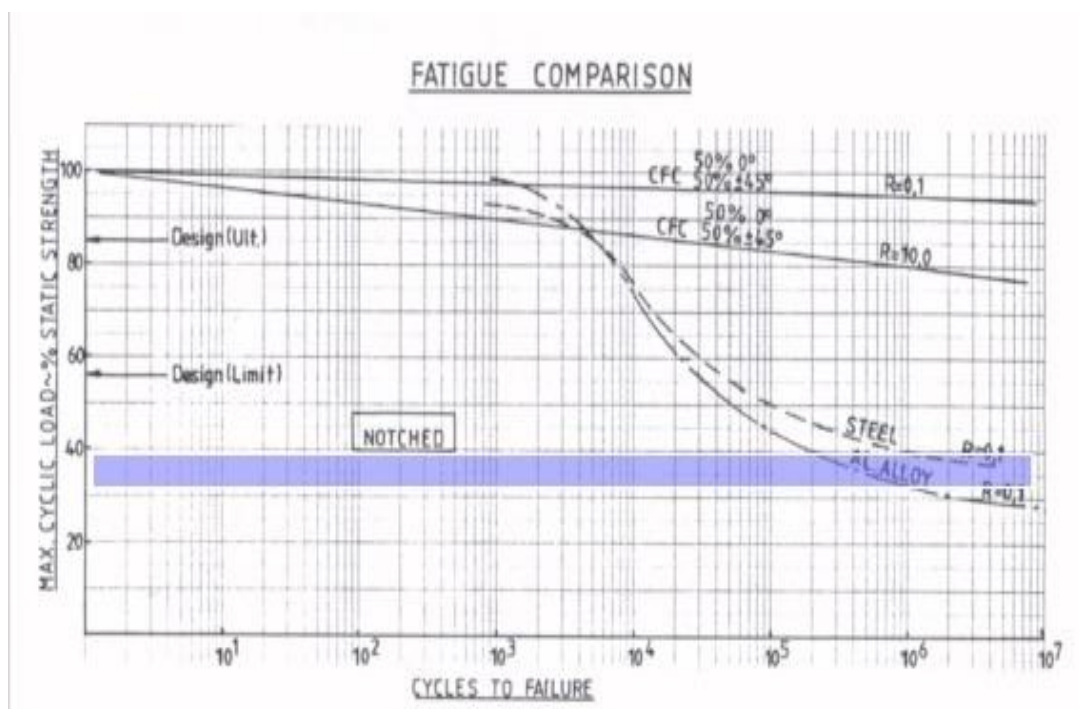
- Rudak kihajlása
- Lemezek hullámosodása
- Gátolt kihajlások

Ezért szoktunk kompozitok esetében a vékony lemezek helyett ahol lehet nagyobb falvastagságú szendvics lemezeket használni. Sík lemezek hullámosodására mutatunk be néhány ábrát.

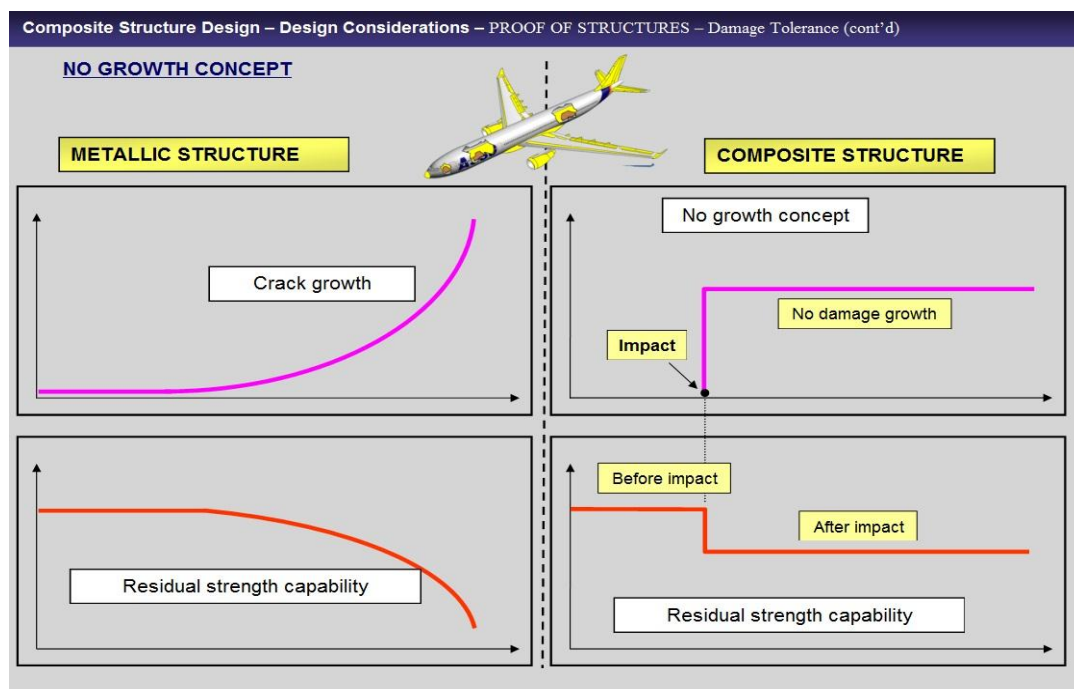




Meg kell vizsgálnunk, hogy a kompozit szerkezetek hogyan viselkednek hosszú időn keresztül ható fárasztó igénybevételek hatására. Megállapíthatjuk, hogy a kompozit gyakorlatilag nem fárad csak öregszik. Az alábbiakban bemutatjuk egy az Airbus által végzett fáradásos vizsgálat végeredményét, illetve azt, hogy hogyan terjed az induló károsodás (repedés) egy fém és egy kompozit szerkezetben.



A repedés terjedése fémekben és kompozitban (Airbus)

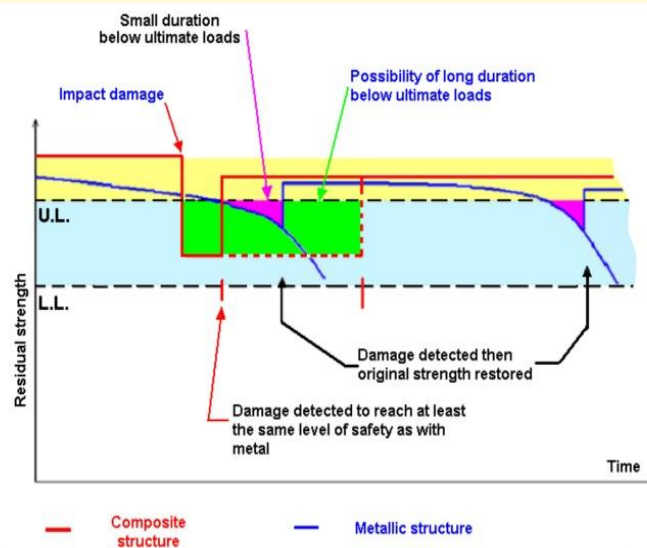


Főleg járműveknél használjuk az úgynevezett Fail-Safe szerkezeteket, amelyek lényege az, úgy alakítjuk ki a szerkezetet, hogy a károsodási sebességet olyan alacsony szinten tartjuk, amely lehetővé teszi annak a rendszeres ellenőrzés – karbantartás során történő felfedezését és kijavítását. bemutatjuk az Airbus egy oktató ábráját, amelyik jól jellemzi a két szerkezet közötti különbséget.

Composite Structure Design – Design Considerations – PROOF OF STRUCTURES – Damage Tolerance (cont'd)

NO GROWTH CONCEPT

The Fail Safe / No Growth approach intends to ensure that permitted manufacturing anomalies and in service impact damage do not propagate in fatigue



- Part design is such that whatever reasonably expected damage occurs during a flight, the damaged structure must be able to sustain the ultimate static load for the completion of the flight.
- Inspection program ensure detection of a damage that reduce the structural capability of the part up to the minimum required residual strength.

Láthatjuk, hogy fémszerkezetek esetén az ellenőrzéseket és javításokat periodikusan meg kell ismételni, míg kompozitoknál erre nincs szükség.

Végezetül foglalkoznunk kell az öregedés és a korrózió problémájával is. Főleg a napfény ultraibolya sugárzásának hatására a matrix anyaga előregszik. Erre jó példa az alábbi ábrán látható öreg telefonkészülék, amelyik úgy állt évekig egy íróasztalon, hogy csak az egyik oldalát sütötte a nap. Megfigyelhető a készülék eldeformálódása.

Sokan azt hiszik, hogy a kompozitoknál nem kell számolni a korrózióval. Sajnos ez nem igaz. Minden esetben meg kell vizsgálnunk, hogy a kompozit rendszer tagjait a várható üzemeltetési környezet mennyiben károsíthatja. Figyelemmel kell lennünk arra, hogy a műanyagokon a víz, vagy az egyes vegyi anyagok átdiffundálhatnak (ozmózis) és ha nem védekezünk ellene súlyos problémákat okozhatnak. Ez ellen megfelelő bevonatok (festés, gél, stb.) használatával, illetve üzemeltetési korlátozásokkal védekezhetünk. Vízi járműveket gyártók közismert problémája, hogy a gél vagy festéksérüléseken behatoló víz feloldja az üvegszálakat, így a kompozit helyileg elveszíti a szilárdságát. Néhány fényképet mutatunk be az ilyen károsodásokról.





7. Kompozit anyagok és szerkezetek szilárdságtani és merevségi vizsgálatai.

Ahhoz, hogy megnyugtatóan tudjunk méretezni és a konstrukciót kialakítani szükségünk van a szilárdsági és merevségi alapadatok ellenőrzésére a konstrukció kialakítás előtt, mégpedig ugyanolyan gyártási körülmények között készített próbatestek segítségével, mint amilyen körülmények között a gyártás történni fog. A kompozitok jellegéből következően nem használhatjuk azokat a próbatest alakokat, mint amelyeket a fémeknél megszoktunk. Az alábbiakban bemutatok egy pár erre a célra jól használható próbatest formát. Az egyik fajta próbatest közepén található lyuk, azt a célt szolgálja, hogy a szakadás kisebb erőnél következzen be.

A következő táblázatban egy ilyen vizsgálati eredményt mutatok be.

A főtaró öv anyagának vizsgálata.

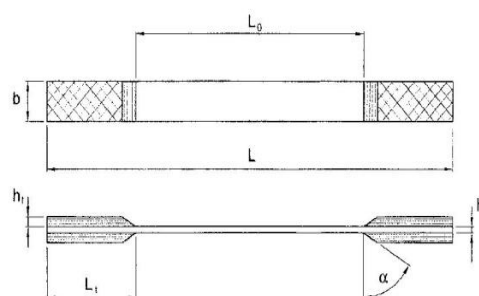
Próbatest száma	Az UD szövet specifikus súlya	A gyanta típusa	A rétegek száma	A rétegek szélessége	A teljes réteg szélesség	A próbatest szakítóereje	A próbatest fajlagos szakítóereje	
	gr/m ²		db	m	m	kN	kN/m	kNm/gr
I/1	500		4	0,01	0,04	25,4	635	1,270
I/2	500		4	0,01	0,04	18,6	465	0,930
II/1	330	LH 160	3	0,01	0,03	10,9	363	1,101
II/2	330	LH 160	3	0,01	0,03	10,2	340	1,030
II/3	330	LH 160	3	0,01	0,03	10,2	340	1,030
II/4	330	L 285	3	0,01	0,03	13,8	460	1,394
II/5	330	L 285	3	0,01	0,03	13,9	463	1,404
II/6	330	L 285	3	0,01	0,03	13,1	437	1,323

B = 20 mm

h = 1,15 mm

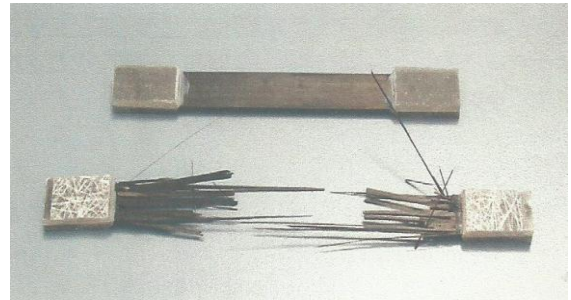
h_t = 2,2 mm

L = 250 mm



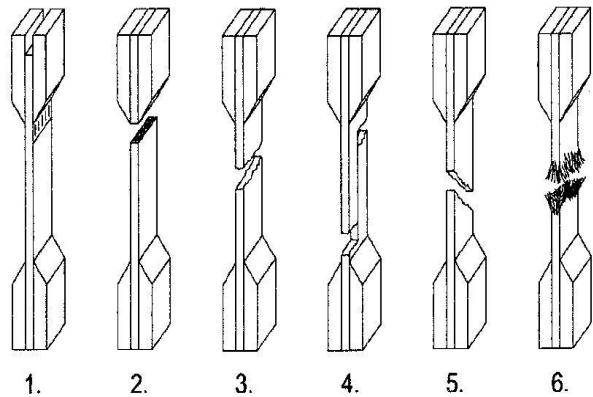
$$L_t = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha = 45^\circ$$



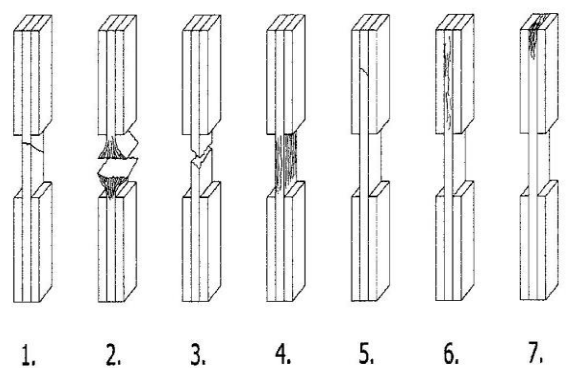
tönkremeneteli formák húzásnál

1. Fülből való kicsúszás
2. Szakadás a befogásnál
3. Keresztirányú szakadás
4. Hosszirányú repedés
5. Átlós szakadás
6. Robbanásszerű tönkremenetel

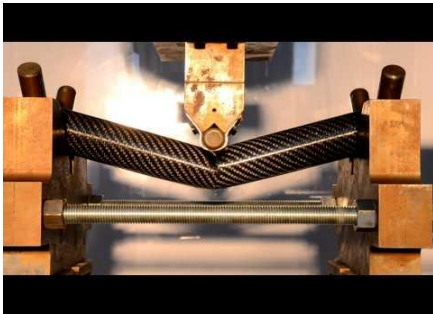


tönkremeneteli formák nyomásnál

1. Átlós elnyíródás
2. Hosszirányú szétrobbanás, seprősödés
3. Keresztirányú elnyíródás



4. Hosszirányú repedések a szabad hosszön
5. Elnyíródás a befogásban
6. Repedezés a befogásban
7. Véglap hasadása



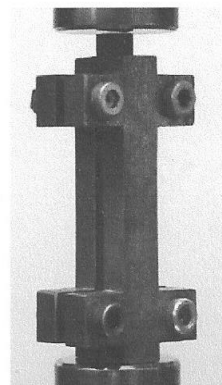
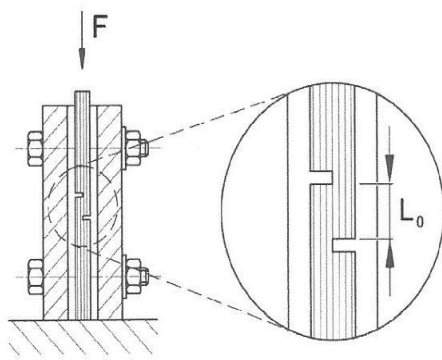
Hajlító vizsgálat



Nyomó vizsgálat

Nyíró vizsgálatok

(Rétegszétválás vizsgálata)



A kész konstrukciók vizsgálata

A konstrukció ellenőrzése, illetve a gyártás minőségének a megfelelése okvetlen szükségessé teszi, hogy a kész darabokat, vagy azok egyes részeit törő illetve terhelési próbának vessük alá. Nagyszériás, illetve kiemelt fontosságú darabok esetén a gyártást

törőpróbák előzhetik meg (sokszor hatósági előírásként), amennyiben ezt nem kell végrehajtani ajánlott (vagy előírt) minden darab biztos terheléses vizsgálata. Az ilyen vizsgálatokra mutatunk be néhány példát.

Helikopter rotor lapát tő vizsgálata



Repülőgépszárnyak vizsgálata

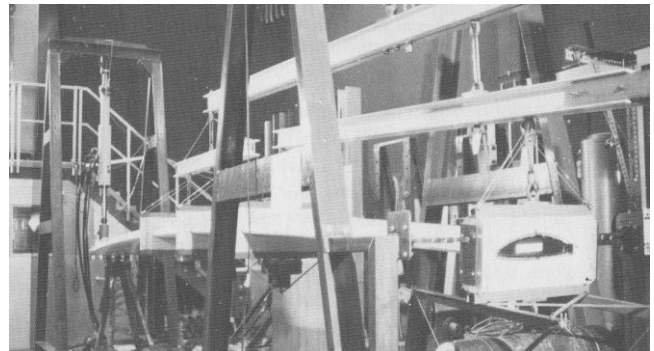
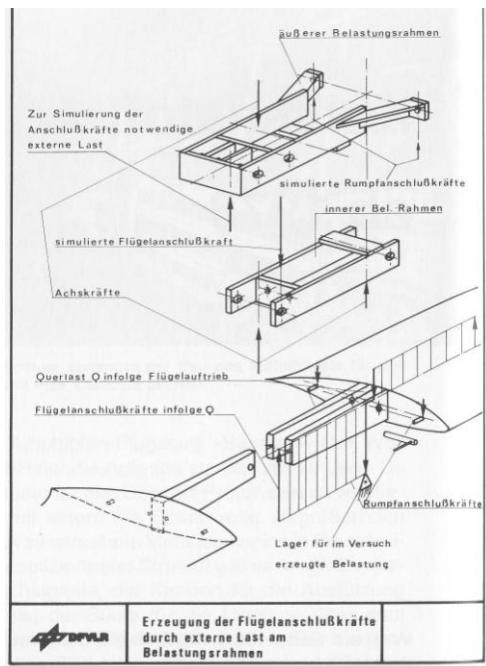
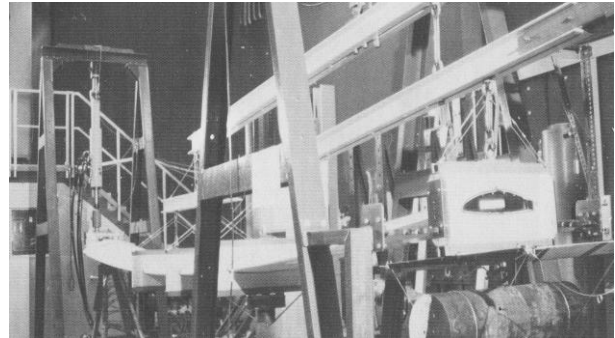


A B-10 kétüléses amphibia szárnyának
terheléspróbája



A Shark kétmotoros repülőgép
szárnyának terheléspróbája

Szárnny terhelési próbái (Schemp Hirth)



DA 40 szárnyterhelés





Boeing 787 Dreamliner



futóművek ejtéspróbája



DA-40

B-10 Amphibia

DA 40 motorfelfüggesztés



Shark, csűrő felfüggesztés



Shark vízszintes vezérsík