

Borján József<sup>1</sup> – Koncz Imre<sup>2</sup> – Óvári Gyula<sup>3</sup>

## FÁTÓL A KOMPOZITIG. A REPÜLŐGÉPEK ÉPÍTÉSÉRE HASZNÁLT SZERKEZETI ANYAGOK FEJLŐDÉSE NAPJAINKIG<sup>4</sup>

*A földi és vízi műszaki létesítmények tartószerkezeteivel szembeni elsődleges követelmény a megfelelő szilárdság. Ez, légijárműveknél kiegészül a lehető legkisebb szerkezeti tömegre való törekvéssel (könnyűépítés elve!), mivel a repülőgép levegőbe emeléséhez tömegével arányos motorteljesítmény szükséges. Ebből adódóan a repülés kezdeti időszakában a konstruktőrök fát használtak építőanyagul, majd később megjelentek a hegesztett acélszövből épített egyes szerkezeti elemek, amit teljesen acélszerkezetek is követtek. A létrehozott fém konstrukciók másik csoportja duraluminiumból készült, de ismeretesebb vegyes építésű kialakítások is. Az utóbbi évtizedekben a kompozit anyagok rohamos elterjedése tapasztalható. (E fejlődési folyamatról szól az alábbi cikk, amelyben a tárgyalt anyag átfogóbb feldolgozását beágyazott internetes hivatkozások segítik, ezért célszerű online internet elérés mellett olvasni.)*

### **FROM THE WOOD TO THE COMPOSITES – THE DEVELOPMENT OF STRUCTURAL MATERIALS USED FOR AIRCRAFT CONSTRUCTION TO DATE**

*The primary requirement for the support elements of technical facilities on the ground and on the water is appropriate strength. In case of aircraft, there is an additional requirement: to minimize the structural weight (the principle of light construction), as in order to be able to lift up the aircraft one needs an engine performance proportionate to the weight of the aircraft. Consequently, in the early years of aviation history constructors used wood as building material, later on certain structural elements were built of welded steel tubes, and then fully steel constructions appeared. To another group of created metallic constructions duralumin constructions, and there are mixed-construction designs too. For the past decades we can see the rapid spread of composite materials. (The article below is about this development process, in which embedded internet links support the more comprehensive processing of the material discussed. For this reason it is advisable to read it with internet access at hand.)*

## REPÜLŐGÉPEK FÁBÓL

### **A fa**

A fa szerkezetének kialakulását ismerve világossá válik, miért is ez volt a kezdetben a repülőgépek sárkányának fő építő anyaga. Létrejött mintegy 420 millió éve kezdődött, a harasztok és zsurlók megjelenésével. A fa szerves anyagokból épül fel, amit maga állít elő szerves vegyületekből. A levelekben lévő klorofill a levegőből széndioxid, a talajból víz és oldott ásványi anyagok, valamint a napsugárzás energiájának felhasználásával szerves vegyületeket hoz létre, melyek közül bizonyos szénhidrátok alkotják a fatest cellulóz-szerkezetének alapanyagát. Utóbbinak (is) köszönhető, hogy a fa (törzs) kivágását követően is, - megőrizve szilárdságát,

<sup>1</sup> okleveles építőmérnök, nyugállományú egyetemi docens (BME) jborjan@gmail.com

<sup>2</sup> repülőmérnök, koncz.imi57@gmail.com

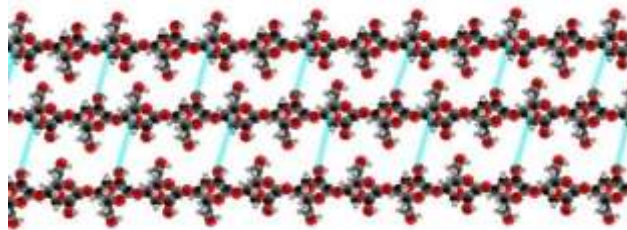
<sup>3</sup> okleveles repülőmérnök, egyetemi tanár (NKE), ovari.gyula@uni-nke.hu

<sup>4</sup> Lektorálta: Dr. Kavas László alezredes, egyetemi docens, NKE KRT, kavas.laszlo@uni-nke.hu

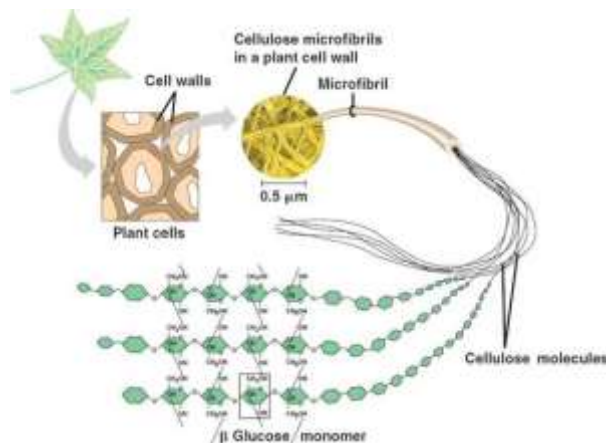
rugalmasságát - a belőle készült tárgyak kitűnően megfelelnek különböző teherviselő szerkezetek, így a repülőgép sárkány építőanyagául is.

### A fatest szerkezete

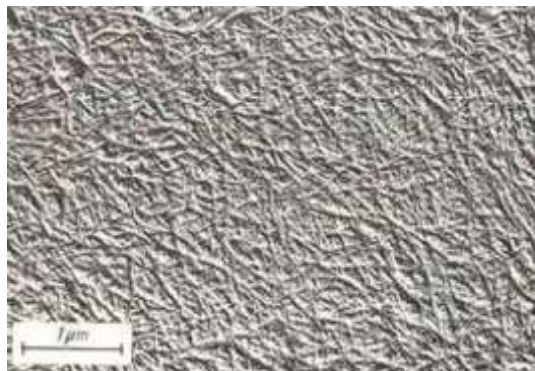
A fa alapanyaga a cellulóz, amely szén, hidrogén és oxigén atomokból álló óriásmolekula lánc (1. ábra) és a sejt élete során szénhidrátokból enzimek segítségével alakul ki (2. ábra).



1. ábra A cellulóz molekula egy szakasza<sup>5</sup>



2. ábra A sejtfalet alkotó fibrillumok vázlata<sup>6</sup>



3. ábra A sejtfalet belülről<sup>7</sup>

Az összekapcsolódó glukóz molekulák 15–20000 egységből álló láncként, az oldalkapcsolatok révén kristályos tulajdonságokat is mutató rostokká válnak. Ezek a mikrofibrillumok, amelyek

<sup>5</sup>(<http://hu.wikipedia.org/wiki/Cellul%C3%B3z#mediaviewer/File:Cellulose-Ibeta-from-xtal-2002-3D-balls.png>)

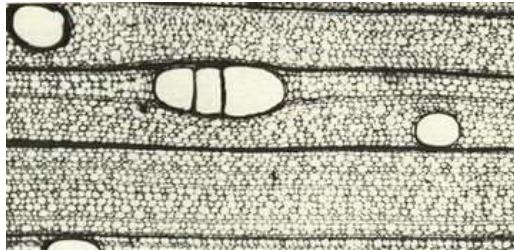
<sup>6</sup> [http://mkk.szie.hu/dep/aeet/tanweb/Fogalomtar/fogalom\\_kep/cellulose.JPG](http://mkk.szie.hu/dep/aeet/tanweb/Fogalomtar/fogalom_kep/cellulose.JPG)

<sup>7</sup> <http://mkk.szie.hu/dep/aeet/tanweb/Fogalomtar/fogalom/kep/cellulose.JPG>

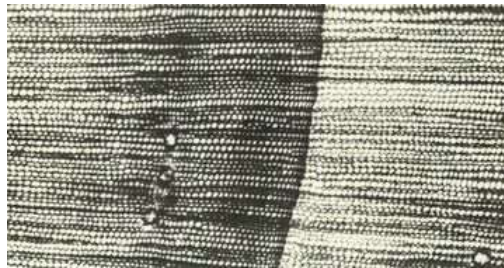
újabb kötege alkotja a fibrillum-szálakat. Az élő, anyagcserét folytató sejtekben alakul ki a sejt-falat képező fibrillum szálak kötege, amely az eredeti sejt-falat folyamatosan vastagítja (3. ábra).

### A fa keresztmetszete

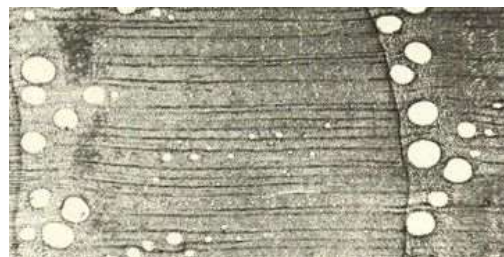
A fatest évről évre úgy növekszik, úgy, hogy a kéreg alatt a sejtek – kifelé a kérget vastagítva, befelé a fatestet növelve – osztódnak. Tavasszal vékonyabb falú, nagyobb sejtek, ősszel vastagabb falú, kisebb sejtek fejlődnek ki. E váltakozása adják az évgyűrűket. Az egyes fafajták más-más sejtszerkezettel rendelkeznek (ld. 4–6. ábra!).



4. ábra Balsafa<sup>8</sup>



5. ábra Erdei fenyő<sup>9</sup>



6. ábra Vörös tölgy<sup>9</sup>

A modellezők által is kedvelt *balsafánál* nagy, vékonyfalú sejtek keletkeznek, így az rendkívül könnyű. A repülőgépeken szárny-törzs átmenetek kialakításához, valamint kitöltő anyagként szendvics szerkezetek kialakításához használták. Az *erdei fenyőt* és a hasonló tulajdonságú fákat is széles körben alkalmazzák, mivel tavaszi pásztáját pl. szikével kivágva, akár ~1 milliméter széles lécek is kialakíthatóak belőle modell alkatrészként. A *vörös tölgyet* tömöttebb sejtjei miatt, – ami nagyobb a teherbírást is eredményez – jellegzetesen nagyobb erőnek kitett teherviselő elemekhez alkalmazzák. Az esetenként benne lévő görcsök viszont nehezítik a repülési építőanyagként történő felhasználást.

<sup>8</sup> Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Rudi Wagenführ und Ing Chr. Sheiber: Holzatlas. Veb Fachbuchverlag Leipzig

<sup>9</sup> Dr. rer. nat. Dipl.-Biol. Rudi Wagenführ: Anatomie des Holzes. Veb Fachbuchverlag Leipzig 1988

A fa az I. Világháború alatt a repülőgépgyártás nélkülözhetetlen anyaga volt, de a II. Világháborúban is készültek fából repülőgépek (pl. 1944-ben, a kis szerkezeti tömege miatt az akkori világ leggyorsabb könnyűbombázója a Hp Mosquito. illetve a legnagyobb vízi- repülőgépe a H-4 Hercules "Spruce Goose" (1947) is nyírfából készült, (bár utóbbi sohasem repült!).

Repülőgép építéséhez leggyakrabban használt faanyagok és jellegzetes alkalmazásai:

- *lucfenyő*: főleg vitorlázó repülőknél, kisebb igénybevétel esetében,
- *kőris, dió, mahagóni*: légsavarok, futómű csúszótalpak,
- *hársfa*: lécek, betétfák,
- *balsa*: kitöltő anyag,
- *nyír, bükk*: réteglemez alapanyaga.

A fa szerkezeti elemek összeerősítéséhez rendszerint fém kötőelemeket alkalmaztak.

## Repülőszerkezetek borítás nélküli, rácsszerkezetű törzzsel

WRIGHT fivérek repülőszerkezetei 1900-tól

Wrighték repülőgépeiket sokáig fa lécekből készítették, (melyek jól szemléltethetők /A Wright testvérek repülőgépe/. c. beágyazott hivatkozáson). Később – Octav Chanute francia hídépítő mérnök javaslatára – mind a sikló, mind a motoros légijárműveikre osztott szárnyfelületeket építettek. A biplán elrendezés előnye, hogy a két szárny – síkjában elhelyezett főtartók dúccokkal összekötve, valamint átlós acélhuzal merevítővel ellátva - kitűnő, stabil térbeli rácisos tartószerkezet. Ez szilárdsági szempontból azért előnyös. mert a terhelésből származó nyomatókat az egész szerkezet együttesen viseli. Repülés közben a felső szárny nyomott, az alsó a húzott övben lesz és a lécek teljes keresztmetszete részt vesz a terhelés felvételében. A nyomatók karja a két szárny távolságával egyenlő. Egy lécc esetében csak a keresztmetszet fele vesz fel nyomóerőt, az is háromszög alakú feszültségeloszlást mutat, tehát negyede a tisztán nyomott övhöz képest és a nyomatók karja a lécc magasságának 2/3-ada. Mivel aerodinamikai szempontból a szárnyprofiloknak vékonyak, íveltnek és könnyűnek kell lennie, két-két főtartóra helyezték a hajlított lécbordákat. A szárnyak síkjában elhelyezett kereszttező huzalmerevítés hosszirányban biztosította a két főtartó együttdolgozását. A főtartók, a bordák, az összekötő dúccok és a merevítő huzalok egy olyan térbeli rácisos szerkezetet alkotnak, amelyek az előforduló terheléseket rendkívül kis saját tömeg mellett képesek felvenni. Ugyanakkor a fa fizikai tulajdonsága azt is lehetővé tette, hogy a két szárnyvéget a profil szerkezeti tengelye körül huzalokkal rugalmasan elcsavarva a kívánt csűrő hatást (hossztengely körüli bedöntést) is kiváltsák. (Jelenleg a repülőgépeken ezt csuklósan rögzített kormánylapok biztosítják. Sport repülőgépeket még a közelmúltban építenek kétfedelűre, döntően kedvező műrepülő sajátosságai és egyszerű földi tárolhatóságuk miatt, de ilyen a még jelenleg is használatos An-2 is).

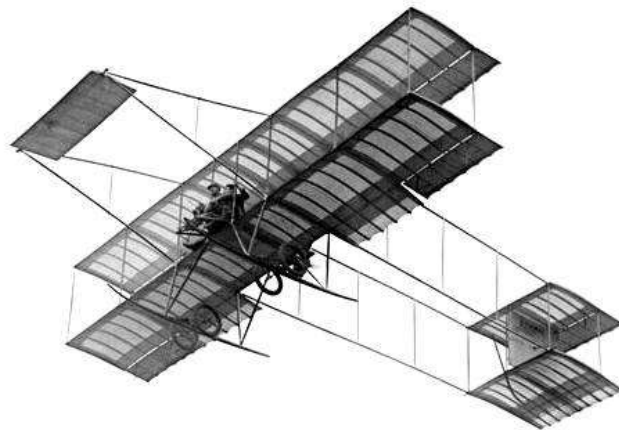
A Wright-fivérek biplánján – a szerkezeti tömeg csökkentése miatt – a hordozó- és irányfelületeket borították be vászonnal, a törzs rácsszerkezete szabadon maradt, a pilóta az alsó szárnyon eleinte fekvő, később ülő helyzetben irányította a repülőgépet (7. ábra). Mellette a négyhengeres motor két, ellentétes irányba forgó toló légsavart hajtott meg kerékpár láncsal, melyek tengelyeit 2-2 összekötő oszlophoz rögzítették. (Wright fivéreknek eredetileg kerékpár javító műhelye volt). Kettős függőleges vezérsíkot a szárny mögött négy darab merevített lécc tartotta. A vízszintes stabilizátorok – ugyancsak huzalmerevítésű lécekre szerelve – elől voltak

(kacsa elrendezés). Futóműként csúszó-talpakat alkalmaztak, a startot egy leeső súllyal mozgató katapult segítette. (A beágyazott videón megtekinthető az építés menete is.)



7. ábra FLYER II.<sup>10</sup>

Számos további konstruktor is alkalmazta a kétfedelű, nyitott, burkolat nélküli, rácsszerkezet-törzset (pl. 8. ábra) (melyek közül több megtekinthető az alábbi hivatkozások segítségével: FABRE vízirepülőgép /francia, 1910./, VALKYRIE /brit, 1910./, BRISTOL BOXKITE /brit/, CURTISS Golden Flyer /USA 1909./, SILVER DART /USA, 1909./, CODY /brit. 1910./)



8. ábra FARMAN III<sup>11</sup>

### Burkolt törzsű repülőgépek megjelenése

A repülési időtartam, sebesség, illetve magasság növekedése szükségessé tette a repülőgép törzsek - legalább is részleges, a személyzetet a külső környezeti hatásoktól védő - borítással történő ellátását. Utóbbiakat, melyben katonai alkalmazás esetén a pilóta mellett a lövész foglalható helyet, (de rendszerint ide rögzítették a motort is) *gondola kialakítású törzsnek* is nevezték (pl. 9. ábra). Még 1917-ben is építettek ilyen törzskialakítású harci és bombázó repülőgépeket. Ennek egyik jellegzetes, és szériában is épített típusa a De Havilland DH 2 volt. A kor hasonló szerkezeti megoldású ismert repülőeszközei voltak még a VOISIN 5 /francia, 1916./, FARMAN HF 23 /francia, 1914./, illetve a VICKERS FB 5 /brit, 1915./.

<sup>10</sup> [http://hu.wikipedia.org/wiki/Wright\\_fiv%C3%A9rek#mediaviewer/File:Flyer-2.jpg](http://hu.wikipedia.org/wiki/Wright_fiv%C3%A9rek#mediaviewer/File:Flyer-2.jpg)

<sup>11</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Farman\\_III](http://en.wikipedia.org/wiki/Farman_III)



9. ábra BREGUET BrM-S

## Hagyományos törzskialakítású repülőgépek

A gondolával szerelt, teljesen burkolt törzsű repülőgépek sarkányának teherviselő vázszerkezete is többnyire teljes egészében fából készült egyre igényesebb technológiával. (A mellékelt beágyazott filmrészlet, egy ilyen légi jármű restaurátor műhelyét mutatja be.)

Három, vagy 4 hosszmerítő lécet, fa rudakkal összekötve, szabályozható feszítőhuzalokkal merevítve alakították ki a vezérsíkokat tartó törzset, amit eleinte vászonnal, később réteges lemezzel borítottak. A motor körüli burkolat általában alumínium lemez volt. (Közel teljes egészében faszervezetű harcirepülőgépet láthatunk ezen a webhelyen.)

Az I. Világháborúban épített repülőgépek tipikus szerkezete: négy hossztartóból kialakított fa rács volt, melyet dúcok és huzalok merevítettek. Ezt vászonnal borították, az aerodinamikai formát törzskeretek és bordák biztosították. A háború végén szolgálatba állított BRISTOL F 2 törzse valamint a magyar rekorder Róma repülőgép (10. ábra) is faszervezetű volt.



10. ábra RÓMA <sup>12</sup>

A korszak további néhány jól bevált repülőgépe volt még a:

- NEUPORT 28 melynek négyövé, faszervezetű törzse a kapcsolódó törzskeretekkel a mellékelt videó segítségével is tanulmányozható: Részletek, a feszítőrendszerek;
- SE 5 A továbbfejlesztett konstrukció volt. Az erősebb motorok és a a szélcsatornában végzett kísérletek eredményeként vastagabb szárnyprofilokból kialakított szárnyat kapott. Ez magasabb főtartóv alkalmazását és más bordaépítést is lehetővé tett. (Jól láthatóak a replika építést megőrkítő filmrészleten a szárny részletei benne a törzs 4 db fa hossztartóból kialakított rács szerkezete. A rácsrudakra íves alaktartó elemeket is rögzítettek, amin sűrű vékony lécezés tartotta a vásznat. Ezt a szerkezeti megoldást több más korabeli repülőgépen is alkalmazták.

<sup>12</sup> Zainko Géza: Képes repülés, repülés képekben <http://kepesrepules.wordpress.com>

## Monoplanok

A kétfedelű repülőgépek mellett sok konstruktőr választotta az egyfedelű, (monoplán) elrendezést. A szárny szerkezete hasonló a kétfedelűekéhez, de a törzsközépre épített pilonokhoz rögzített külső merevítő huzalokkal biztosították a szárny megfelelő hajlító merevségét. Kivétel az Etrich Taube gépe, amely ezen kívül még a szárny alatt futó lécet is tartalmazott. Ez a két főtartóval egy háromövű térbeli tartórácsot képezve merevítette a szárnyat. Egyébként, ez volt az első, még az első világháború előtt, harctéren is bevetett repülőgép (1911 olasz-török háború). A monoplánokon a vezérsíkok már rendszerint a törzs, borítással ellátott farokrészére rögzítettek. Legegyszerűbb megoldást a Fokker Spinne típusnál látható, ahol két fatartót, huzalokkal merevítettek. A baldachin és a törzsmerevítők fémcsőből készültek.

Hasonlóan, BLERIOT mellékelt a vázlatán is jól látszik, hogy az egész repülőgép faépítésű volt, csak a futómű és baldachinok készültek fémből. A szárnyat huzalokkal rögzítették (merevítették) az utóbbiakhoz. A rácsszerkezetű törzs övrészét 4 darab fa rúd alkotja, melyeket dúcok kötnek össze és mezőnként átlós huzallal merevítettek. A törzs elejét vászonnal borították. Ezt a teherviselő rendszert még nagyméretű bombázó repülőgépek esetében is alkalmazták, de ott a teljes felületet eleinte vászonnal, később réteges lemezzel borították. (Ilyen törzs szerkezet tekinthető meg a mellékelt videókban is, valamint hasonló konstrukciók: a ZEPPELIN STAKEN 8301 /német, 1918./, SPAD XIII /brit, 1918./, a HANDLEY PAGE 0/100 /brit, 1918./ és a Be 2C /brit, 1916./ is láthatóak a további beágyazott részleteken).

A bemutatott vászon- és furnér borítású rácsszerkezetű konstrukciók közös sajátossága, hogy a *borítás* - csak kedvezőbb aerodinamikai formát biztosít a törzsnek, védi a személyzetet, a rakományt a környezeti hatásoktól, de - *nem vesz részt a terhelések felvételében*.

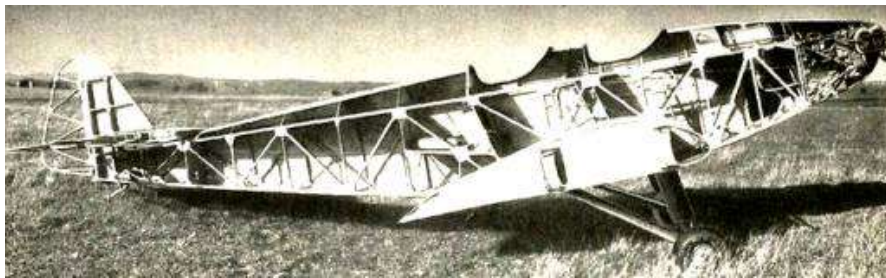
### Félhéj és héjszerkezetű törzsek létrehozása

A repülőgép-építés fejlődésének következő szükségszerű állomása a borítás fokozatos bekapcsolása volt a terhelések felvételébe. Ennek első lépéseként a megerősített borítás - mint zárt kontúr – a csavarás, valamint vízszintes és függőleges nyírások, nyírófolyam formájában történő felvételére vált alkalmassá. Ez, az ún. **félhéj szerkezet**, amelyben rendszerint külön tartóelemek, ún. hossztartó gerendák, – az I-profil analógiájára – képesek a hajlításokat húzás-nyomás formájában felvenni. A tudomány és a gyártástechnológia további fejlődése lehetővé tette kizárólag a borítás alkalmassá tételét valamennyi terhelés felvételére. Ez utóbbit nevezik **héjszerkezetnek**. Az első ilyen repülőgépet a Deperdussin cég készítette. Egy sablonra réteges-lemez csíkokat rögzítettek, melyek száliránya a törzs tengelyével szöget zárt be a fő csavarási igénybevételeknek megfelelően. (Ezt illusztrálja a MONOCOQUE Racer 1913. ahol a törzs közelről is megsejtelhető, illetve tapasztalható, hogy az olyan könnyű, amit egy ember elbír. Itt a ferde szálirányú réteges lemez burkolás tanulmányozására is lehetőség nyílik.)

A fejlesztés következő állomását az Albatros cég ALBATROS B-2 konstrukciója jelentette, amely fa, réteges-lemez burkolattal készült. Ezt követte az I. Világháború vége felé elkészült ALBATROS D V. modell. Jellegzetessége a masszív fa szerkezet, amely már a héjszerkezet előhírnökének tekinthető. (Ezt illusztrálják a Wikipédiában: A szárny bevonat nélkül. A törzs szerkezete. A szárnyvég. Eredeti példány. Törzskeretek. címszavak alatt fellelhető részletek.)

MOSQUITO a De Havilland gyár által készített Mosquito a II. világháború egyik leggyorsabb vadászbombázó repülőgépe volt, melynek törzse és szárnya fából készült. Ez lehetővé tette, hogy a konstrukció a szokásosnál könnyebb legyen így a hasznos terhelése és/vagy a hatótávolsága nagyobb lehetett, mint a kategóriája tisztán fémépítésű repülőgépeié. (A témához értékes információk nyerhetők egy restaurált példány gyártási fázisairól készült videóról, illetve a következő Video: Az eredeti gyártása Replika gyártása hivatkozásokból)

H4 HERCULES a legnagyobb fa építésű repülőgép volt, (melyről a Wikipediában – többek között – az alábbi adalékok láthatóak: A törzs hátsó része belülről A gép képe előlről vontatva AIRSPED HORSÁ a II. Világháború teljesen faépítésű vitorlázó repülőgépe volt (ld. még Horsa Panorama video!), de a más prototípusok is készült fából (ld. pl. HURRIKAN fából).



11. ábra Egy tipikusan fa szerkezetű gép metszete<sup>13</sup>

## REPÜLŐGÉP SZERKEZETI ELEMÉK FÉMBŐL

A fémek közül az acélt, majd az alumínium ötvözeteit kezdték alkalmazni a repülőgép teherviselő rácsszerkezetének kialakítására, majd később a titán is szerepet kapott. Az acél alapesetben vas és szén ötvözete, de tulajdonságai más ötvöző-anyagokkal is módosíthatóak. Az acélok szilárdsága elsősorban a széntartalomtól, az esteleges ötvözőktől és az alkalmazott hőkezelési eljárástól függ. A tiszta az alumínium sem alkalmas szerkezeti anyagnak, rendszerint az ötvözeteit használják, a repülőgép-építésben ez tipikusan a dúralumínium.

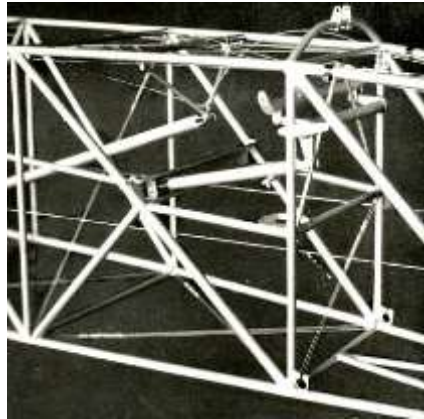
### **Vegyes építési mód: acélcső rácsszerkezetű törzsek és faszerkezetű hordfelületekkel épített repülőgépek**

Acélsőből kialakított rácsszerkezetű törzsű repülőgépeket máig építenek sport célokra. (Néhány, az internet segítségével fellelhető további, kapcsolódó információ: Repülőgép szerkezetek: a finn Hurrican törzse, Vickers Wimpy hordfelületek, fa, törzs acél vagy fa vegyes váz vászonborítású acélső, Gyártósor, az UT-2 és JAK-18 típusokról Ozsváth cikke Wikipedia Oldalkép, Video, Lavocskin La 5 és La 7. Még egy példa az alaktartó fa De Havilland DH 83 De Havilland DH 80 törzs szárny vezérsík kialakítására. Jól példázza ezt a szerkezeti kialakítást a GENERAL AIRCRAFT **HAMILCAR** Szállító vitorlázó repülőgépe mely 1942-ben Angliában épült: Múzeumban, A II. világháború repülőgépeiből:).

<sup>13</sup> Otto Mairer Verlag: Sportfliegen. Ravensburg 1935.



## Acélcsövekből kialakított rácsszerkezet

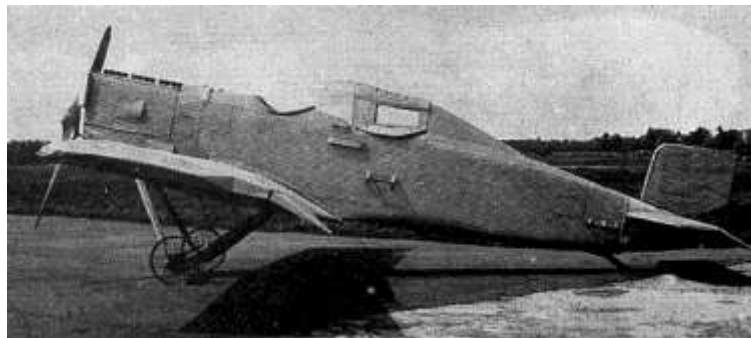


12. ábra Egy acélcső váz részlete<sup>14</sup>

A **Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG (JFM**, korábban **JCO**, az I. világháború idején **JKO**), cég tervezte és építette az első teljesen fémépítésű repülőgépeket **JUNKERS J 1** típusjelöléssel 1915-ben. Ezt követte a **JUNKERS J 2** monoplán, melynek vastagabb profilokból kialakított szabadonhordó, szárnya lehetővé tette, a külső merevítő huzalok mellőzését, így a légellenállás csökkentését.

### A Junkers koncepció

A Junkers által tervezett repülőgépek törzse és a szárnya acélcsövekből épített erős térrács szerkezet volt, melyre szegecseléssel hullámosított alumíniumlemez borítást rögzítettek. E megoldást következetesen alkalmazták a vezérsíkok esetében is. (Ilyen szerkezetet egy Junkers F-13-as restaurációs munkája során készített, illetve a Junkers F-13 és G-24, Junkers filmdokumente, Ju-52, G-38 ) videók segítségével tanulmányozható.



13. ábra Junkers J10<sup>15</sup>

### A hullámosítás szerepe

Egy hajlított tartót alapul véve, abban a hajlítás során a görbület külső ívén húzás, a belsón nyomás keletkezik. A létrejövő belső feszültségek eredője a külső erőkből származó nyomatékkkal tart egyensúlyt. A hullámosított lemez külső és belső pontjai közötti magasságkülönbség miatt, egyik a

<sup>14</sup> Dr.Ing. W. von Langsdorf: Jahrbuch 1929/30. Bechhold Verlag Frankfurt 1929.

<sup>15</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/File:JunkersJ10.jpg>

nyomott, a másik a húzott övben helyezkedik el, az összekötő rész pedig biztosítja a kapcsolatot és felveszi a nyírófeszültségeket. A hullámosítás tehát egyik irányban merevebbé teszi a lemezt.

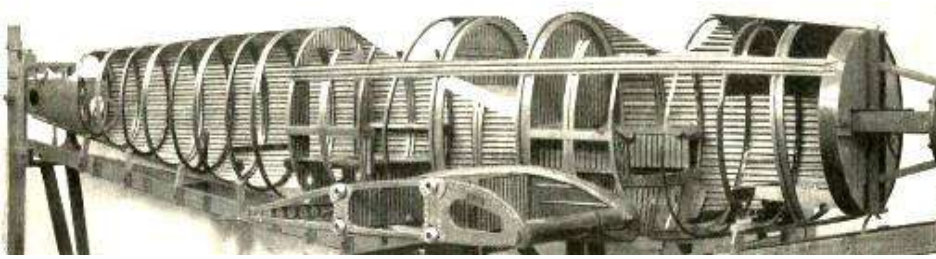
## Megoldások

A hullámosított lemezt az egyenes keretszerkezeti elemekre a hullámvölgyekben szegeccssorral rögzítik. A hullámlemez csatlakozása a törzs tartószerkezetéhez belülről jól látszik. Gondot jelent a hullámlemezek végének "eldolgozása". Ezt úgy oldják meg, hogy a lemezek végén minden hullamba két, három kisebb hullámhosszú alakzatot sajtolnak, így már könnyebb a síkfelülethez illeszteni a lemez széleket. Mindez jól megfigyelhető (az előbbi képen is) a motorburkolathoz való csatlakozásnál, ahol a szegeccsorok is jól láthatóak. A végső kialakításban aztán belső, sík burkolólemez takarta el a vázszerkezetet. Így néz ki ma is a turistaforgalomban használt Ju-52 belső tere. Praktikus a törzs görbületeinek a követése, valamint az egyenes elemekkel való kisszögű csatlakozás megvalósítása. Külön érdekes a törzsvégén eldolgozott hullámlemez és a vezérsíkokon alkalmazott borítás is. A bordasűrítést a vezérsíkok belépőélei mentén is alkalmazták. A hullámlemez célszerű kialakításával követhető a törzsvég méretcsökkenése is. A hordfelületeken a hullámok az áramlásra merőlegesek. Nagyobb a hullámhossz a szárnyon, kisebbek az irányfelületeken találhatóak. Érdekes a motor áramvonalas burkolata és a hullámlemez csatlakozása is, ahol olyan külön takarólécet használtak, ami egyik oldalon a motorburkolathoz simul, a másikon meg a hullámok közé illeszkedik. A belépő élnél külön mélyhúzott elemeket helyeztek el a szárnytőnél, többi belépő élnél pedig a kishullámhosszú eldolgozást alkalmazták. A képen jól látható a belépő élhez csatlakozó eldolgozás, illetve a futószárok megengedett rugalmas deformációját lehetővé tevő nagyobb nyílás a burkolaton. A kilépő élknél a hullámlemezt szegeccseléssel azonos fázisban illesztették.

(Az alábbiakban, beépített hivatkozások segítségével néhány korai Junkers konstrukció tanulmányozható. Az első sportgépek egyike egy korai Junkers mely a mellékleten a restauráció előtt látható. A híres F-13-as is több változatban jelenik meg F-13-as a Wikipediában. Egy ilyen repülőgépgép a Közlekedési Múzeumban is megtekinthető. A következő videóban a beszállás előtt körbejárható egy Ju -52 es, megtekinthető belülről is a törzsszerkezet, majd a három motor zaja közepette nosztalgiautazáson is részt lehet venni. Egy roncs, illetve egy amerikai repülőgépen is tanulmányozható a Junkers koncepció. A burkoló lemez hullámosítását Rubik Ernő is alkalmazta a Góbé nevű vitorlázó repülőgépén. Egy tipikus acélszerkezetű repülőgép részleteit figyelhetők meg az alábbi képsorozaton., valamint hajlított lemez profilok és a szegecselt rácselemek. C 47 törzs héjszerkezetén.)



14. ábra A nagy Ju-52 szerkezete<sup>16</sup>



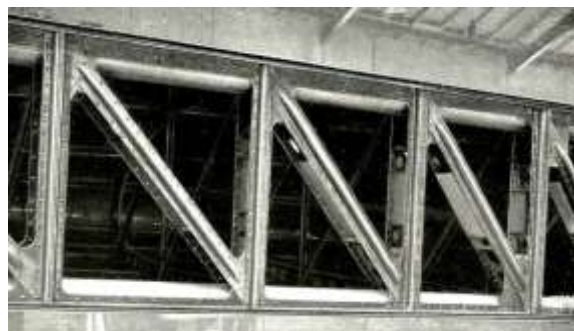
15. ábra korai héjszerkezetű repülőgéptörzs<sup>17</sup>

### *Duraluminium szerkezetek a 20-as években:*

Duraluminium lemezekből hajlítással és élhajlítással merevített elemekből, szegecseléssel is alakítható ki teherviselő szerkezet (16. és 17. ábra).



16. ábra Szárnyközép a 20-as évekből<sup>18</sup>



17. ábra Főtartó részletek a 20-as évekből<sup>19</sup>

(Ez a hivatkozás is egy alumínium törzsre vezet.)

### *A geodetikus rendszer*

<sup>16</sup> Dr.Ing. W. von Langsdorf: Jahrbuch 1929/30. Bechhold Verlag Frankfurt 1929

<sup>17</sup> Otto Mairer Verlag: Sportfliegen. Ravensburg 1935

<sup>18</sup> Dr.Ing. W. von Langsdorf: Jahrbuch 1929/30. Bechhold Verlag Frankfurt 1929

<sup>19</sup> Dr.Ing. W. von Langsdorf: Jahrbuch 1929/30. Bechhold Verlag Frankfurt 1929

A Vickers repülőgépgyár által gyártott Wellington bombázó repülőgépnél egyedi, ún. geodetikus<sup>20</sup> elrendezést alkalmaztak mind a törzs, mind a hordfelületek esetében (18. ábra).



18. ábra A Wellington törzse<sup>21</sup>

A Wellington törzsét egymást metsző diagonális rudakkal, ún. geodetikus rácsszerkezettel merevítette a Vickers cég. A diagonálisan futó I szelvényű duralumínium tartókra merőlegesen csatlakoznak az ugyanilyen szelvényű összekötő elemek egy-egy övhevederrel átkötve. Az előre gyártott mezőket összeszereléskor acél csövekhez csatlakoztatják. A teherviselő rácstra hosszmerítőköt csavarozták, erre pedig vászon borítás került. A héjszerkezetű törzseknél helyenként bordákkal merevítették a borítást.

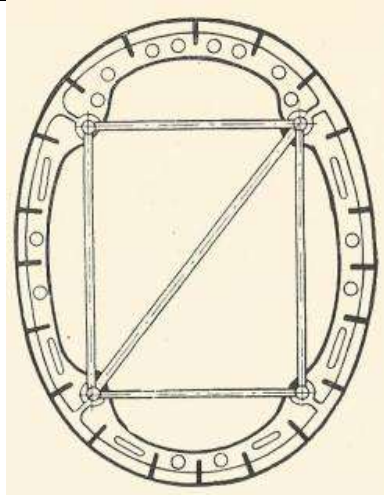
(A beágyazott képen a lövések okozta sérülés nyomán jól látható a törzsvég rácsszerkezete és a leszakadó vászon is. Ezen kívül egy roncsban is megfigyelhető a sárkányszerkezet, illetve videó mutatja be a szerelést, melyben a repülőgép vezérsíkjainak és a szárnytőnek a szerkezete is látható. További képeken a törzs belülről, és annak szerelése. látható. A szárnyak, hordfelületek alakját egyértelműen az aerodinamika követelmények határozza meg. A háromnézeti rajzokon is látszik, hogy a szárnyfelület is geodetikus szerkezete, melyet a Vickers cég Wellingtonjánál a szárny és a vezérsíkok, illetve szárny és törzs csatlakozásánál, is következetesen alkalmazott. Szimulációval áttekinthető a Wellington szerkezete is.)

### ***További képadalékok a fémépítésű repülőgépekhez***

Több korai fémépítésű repülőgép törzs kívánt szilárdságát, törzskereteit erősítő négyzet keresztmetszetű rácsrudakkal valamint a borítására rögzített hosszmerítőkkel biztosították (19. ábra).

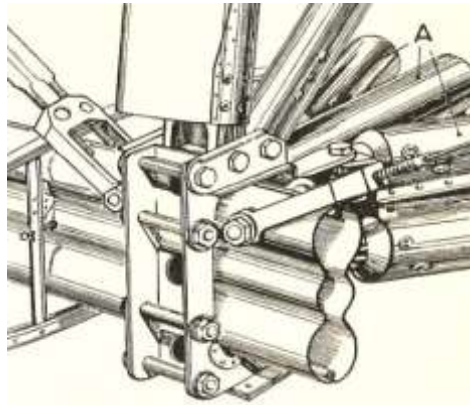
<sup>20</sup> "Mi is ez a geodetikus csoda?" (idézet a Mester Kiadó "A világ repülőgépei" c. képes krónika gyűjteményéből, a 10. csoport 47. kártyájáról.) A geodetikus vonal a legrövidebb egyenes két olyan pont között, amely egy ívelt felületen helyezkedik el, végig azon halad. A Földön például Budapest és New York között, ha a felszínen haladunk, pontosan abba az irányba, ilyen geodetikus vonalat járunk be. Barnes Wallis a Wellington főkonstruktor a léghajótervezésből vette át a rendszert. Az R 100-as léghajó tervezésében vett részt. Előző ötlet egy geodetikus szerkezetű hajó volt 1794-ből. Wallis első ilyen repülőgépe a Vickers Wellesley volt. A gép vázrajza és részlete. A harmadik geodetikus vázzal épített repülőgép-család a Warwick nevet kapta. A gép képe, törzsrészlet, szárnyrészlet.

<sup>21</sup> <http://cdn-www.airliners.net/aviation-photos/photos/3/0/7/0500703.jpg>



19. ábra Alakadó keretek<sup>22</sup>

A hajlított duraluminium lemezekből készített szerkezeti elemeket bonyolult kapcsolatokkal alakították ki. Egy vadász-repülőgép főtartó rögzítését mutatja a 20. ábra.



20. ábra csomópont<sup>23</sup>

Egy korabeli repülőgéptörzs fém teherviselő rendszerének kialakítása látható a 21. ábrán.



21. ábra Heinkel He 70 törzsrészlete<sup>24</sup>

<sup>22</sup> Gerhard Otto: Rumpf. Volckmann Kiadó Berlin 1938.

<sup>23</sup> Gerhard Otto: Rumpf. Volckmann Kiadó Berlin 1938.

<sup>24</sup> Gerhard Otto: Rumpf. Volckmann Kiadó Berlin 1938.

## A REPÜLŐGÉPGYÁRTÁSBAN ALKALMAZOTT KOMPOZIT ANYAGOK ÁTTEKINTÉSE

### Bevezetés

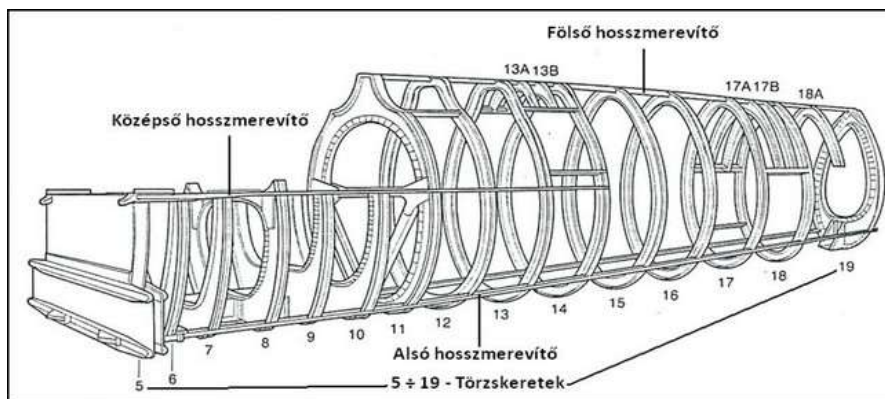
#### *Kompozit anyag fogalmi meghatározása*

Kompozit anyagokon általában legalább kétféle-, makroszkópiusan és funkcionálisan is elkülöníthető anyag (összetevő), társítását értjük, egy adott szerkezeti egységen belül. Ez a kétféle összetevő funkció szerint az erősítőanyag, vagy vázanyag (reinforcement) és a beágyazó anyag (mátrix). A kompozit anyagokat a különböző fizikai (mechanikai) jellemzőkkel bíró anyagok előnyös tulajdonságainak kombinálása, jobb kihasználhatósága miatt hozták létre.

*Megjegyzés:* a kompozit- és a szendvicsszerkezetek fogalma különböző! Az előbbiek anyagkombinációt, míg az utóbbiak szerkezeti kialakítást jelölnek. Ennek megfelelően, a szendvicsszerkezet nem alapvetően kompozit anyagú és a kompozit-szerkezet nem feltétlenül szendvicsszerkezet is egyben!

#### *A kompozit anyagok történelmi áttekintése*

A természetben is előfordulnak „kompozit anyagok”, melyek közül legismertebbek: a fa, a bőr, a bambusznád és a csont. A klasszikus értelemben vett, ember alkotta kompozit anyagokat már a történelem előtti időkben is használták őseink, melyek közül legismertebbek a vályogtégla és a „vert-fal”, amelyeknél a gyenge mechanikai szilárdságú agyagot a hozzákevert növényi eredetű rostok (például: szalma) illetve fűzfavessző-fonadék használatával sikerült teherbíróbbá tenni. Ugyanezen elvek alapján született meg évezredekkel később a ma is használatos vasbeton. Ezen anyagok voltak az előfutárai a mai értelemben vett kompozit anyagoknak. Az első ilyen (még napjainkban is használt) „modern” kompozit anyag a fenol-formaldehid gyantával kombinált erősítőszövet, a „TEXTILBAKELIT” melynek beágyazó anyaga a „BAKELITE” (fenol-formaldehid gyanta) igen rideg, törékeny és gyenge mechanikai tulajdonságú műanyagnak bizonyult, ezért természetes textilszövettel megerősítve tették alkalmassá a széleskörű ipari felhasználásra.



<sup>25</sup> [http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012\\_cikkek/34\\_Lukacs\\_Laszlo-Szalay\\_Andras\\_Zador\\_Istvan.pdf](http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/34_Lukacs_Laszlo-Szalay_Andras_Zador_Istvan.pdf)



23. ábra Repülőgéptörzs építése<sup>27</sup>

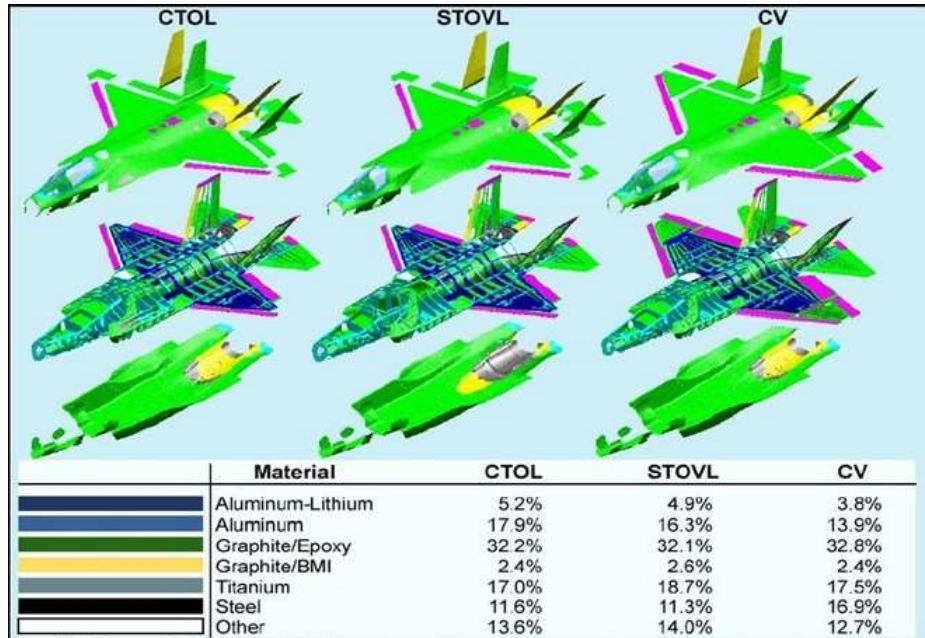
A repülőgép-építésben jelentős mennyiségben először alkalmazott kompozit anyag az 1930-as évek végén az Aero Reserach Ltd. által kifejlesztett GORDON AEROLITE fantázianevű egyirányú szalag volt, amelyet fenol-gyantával átitatott fonatlan (sodrás nélküli) len-szálakból készítettek. Ebből az anyagból gyártottak kísérletképpen (1940-ben) a II. világháború egyik leg híresebb vadászpilóta repülőgépe: a „SUPERMARINE SPITFIRE” törzse hátsó részét a (törzskereteit hosszmerítőit és törzsbőrítését), melyeket hagyományos szegecseléssel erősítettek össze. (22. és 23. ábra)

A következő lépcsőfokot a nagyszilárdságú üvegszál és poliésztergyanta „összeházasításával” előállított kompozitok fémjelzik, melyeket először egy 1943-ban az USA-ban készült oktató-kiképző repülőgép (Vultee XBT-16) törzs-hátsórészének készítésénél alkalmaztak, az ugyan csak újdonságnak számító méhsejt felhasználásával alkotott „szendvicsszerkezetű konstrukció” megalkotásához. A fejlődés tovább folytatódott, a repülőgép építésben megjelentek az epoxigyanta mátrixanyagok, melyeket először üvegszálból, majd szén-, illetve grafit-szálakból, aramid-szálakból, bórszálakból, kerámiaszálakból, stb, vagy ezek kombinációjából készült „vázanyagokkal” erősítettek meg. Jelenleg már jelentős mennyiségben használnak magasabb üzemi hőmérsékletet elviselő „Poliimid- (polyimide) és Bismaleinimid (bismaleimide) hőre keményedő mátrixgyantákat (Thermosetting resins), valamint hőre lágyuló polimereket (themoplastics) az erősítőanyagok beágyazására. Napjainkban szinte bármely rendeltetésű merev és forgószárnyas polgári, valamint katonai repülőgép sárkányszerkezetében széleskörűen

<sup>26</sup> Donald H. Middleton: Composite materials in aircraft structures (book) Issue date: 1990. Volume: 394 pages

<sup>27</sup> AIRBUS: All Aircrafts Composite Engineering (Training Course:XSC3 CD) Ref. No: X4T07202. Issue date: March 27, 2008.

alkalmazzák a korszerű kompozit anyagokat (pl. 24. sz. ábra). A sportrepülésben és a hadiiparban összegyűlt tapasztalatok alapján már a közforgalmú repülésben is egyre elterjedtebben használnak kompozit-anyagokat az elsődleges teherviselő szerkezetek készítésére is. Erre jó példa a 25. sz. ábrán látható AIRBUS A380-as „óriásgép” melynél a sárkányszerkezetben 26% a kompozit-anyagok súlyaránya, amely volumenében (térfogatszázalékában) még kedvezőbb, mert a polimer-kompozitok sűrűsége átlagosan 2 kg/dm<sup>3</sup> körüli.



24. ábra Lockheed-Martin F-35 Joint Strike Fighter különböző változataiban sárkányszerkezetében felhasznált anyagok<sup>28</sup>



<sup>28</sup> BOEING: Advanced Composite Repair for Engineers (Training manual) Publication No: 7X7. Issue date: May 30, 1997. Volume: 280 pages.



A hangsebesség alatti tartományban repülő közforgalmi légitársaságok esetében felhasznált kompozitanyagok aránya már meghaladja az 50 tömegszázalékot is. Erre a legjobb példa az első kompozit szerkezetű túlnyomásos törzzsel, szárnyakkal és vezérsíkkal készült légitársaság a BOEING B787 „Dreamliner”, melynek az építéséhez felhasznált „anyagféléseket” a 26. ábra mutatja be.



26. ábra BOEING B787 „Dreamliner” építéséhez alkalmazott szerkezeti anyagok<sup>30</sup>

## A kompozit anyagok jellemzői, kompozit-szerkezetek csoportosítása

### *Kompozitok előnyei:*

- jelentős súlymegtakarítás;
- anizotrópia (ortotrópia);
- korrózió- és időjárás-állóság;
- hosszú élettartam, kifáradással szembeni ellenállóság;
- rezgéscsillapítás;
- szerkezeti egyszerűség;
- formai szabadság, esztétikus kivitel;
- alaktartás és mérsékelt hőtágulás;
- alacsony „felszerszámozási” költségek;
- csökkent radarhullám visszaverő képesség, alacsony észlelhetőség;
- alacsony üzemeltetési- és karbantartási költsége.

### *Kompozitok hátrányai:*

- magas előállítási költségek;
- alacsony ütésállóság és sérülésállóság (szén-, grafit-, bórszál);
- statikus feltöltődésre való hajlam és alacsony villámcsapástűrő tulajdonságok;

<sup>29</sup> ASM International: Composites (Engineered Materials Handbook) Issue date: 1987. Volume: 983 pages. GURIT Co: Guide to Composites 2008. (Brochure)

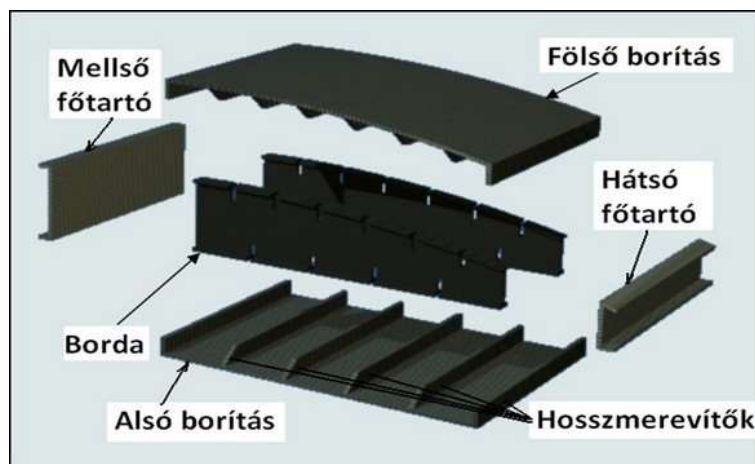
<sup>30</sup> Doc. No: GTC-2-0708. Issue date: 2008. Volume: 72 pages

- alacsonyabb rétegek közti szilárdság, gyenge palástnyomás állóság;
- bonyolultabb, körülményesebb, drágább és precízebb javíthatóság;
- nedvességfelvétel;
- túlmelegedés okozta torzulás, deformáció.

## Kompozit-szerkezetek csoportosítása

### *Tömör, monolitikus kompozit-szerkezetek*

A tömör, monolitikus kompozit-szerkezetek tipikus félhéjszerkezetek, melyeknél a szerkezeti merevséget a többrétegű borítás, a hosszirányú merevítő elemek (főtartók, hosszmerítők) és a keresztirányú merevítők (törzskeretek, bordák) együttesen biztosítják. A monolitikus szerkezet felépítését a 27. ábra szemlélteti.



27. ábra Kompozit építésű szárny szerkezeti elemei<sup>31</sup>

### *A monolitikus kompozit-szerkezetek előnyei:*

- csökkentett karbantartási igény;
- alacsonyabb gyártási költségek szendvicsszerkezethez képest;
- jobb sérülésállóság, ütésállóság;
- nincs nedvességfelvételtől fakadó rongálódás.

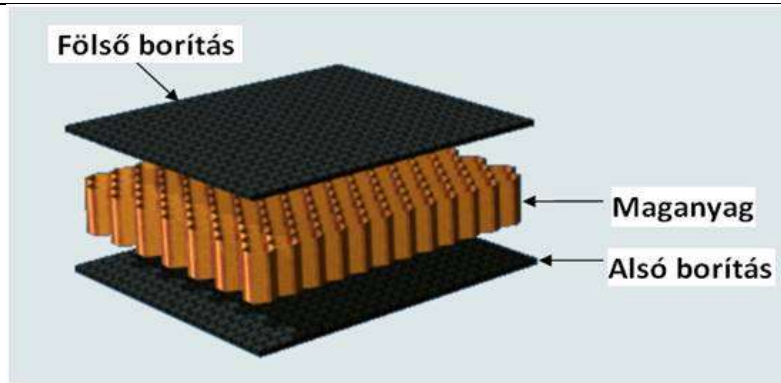
### *A monolitikus kompozit-szerkezetek hátrányai:*

- nehezebb, mint az azonos szilárdságú szendvicsszerkezet;
- kiegészítő elemek szükségesek a hajlító-, és csavaró-merevség biztosításához;
- rosszabb a merevséghez viszonyított súlyaránya a szendvicsszerkezethez képest.

## Szendvicsszerkezetek

A szendvicsszerkezetek esetében a szerkezet merevségét a viszonylag vékony külső- és belső borítások és a köztük lévő, hozzájuk erősített (ragasztott), leggyakrabban méhsejt vagy zártcellás hab maganyag biztosítják kiegészítő merevítő elemek nélkül, ezért ezek a szerkezetek héjszerkezetnek tekintendők (28. ábra).

<sup>31</sup> Gáti Balázs –Koncz Imre: Repülőgépek Szerkezete (Egyetemi tananyag elektronikus formában) Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében. Issue date: 2012. Volume: 174 pages.



28. ábra Szendvicsszerkezet elvi felépítése<sup>32</sup>

#### A szendvicsszerkezetek előnyei:

- legnagyobb merevség a legkisebb szerkezeti tömeg mellett;
- magas csavaró-merevség;
- kiváló hőszigetelő képesség;
- kiváló zajcsillapítási tulajdonságok.

#### A szendvicsszerkezetek hátrányai:

- nedvességfelvételre hajlamos, és érzékeny az ebből fakadó roncsolódásra;
- alacsonyabb ütésállóság, mint a tömör szerkezeteknél;
- magasabb gyártási költségek.

### Korszerű repülőgép-ipari kompozit anyagok

#### Anyagok csoportosítása:

- erősítőanyagok (vázanyagok, erősítőszálak)
- mátrixanyagok (beágyazó-anyagok)
- maganyagok
- ragasztók
- töltőanyagok (adalékanyagok)
- segédanyagok

### A repülőgépgyártás és javítás során alkalmazott kompozit gyártási eljárások

#### Kézi laminálás nedves impregnálással (Wet-layup):

Az egyik legrégebben alkalmazott eljárás, melyet napjainkban már csak a kisgépek gyártásához illetve különféle kisebb javításokhoz használnak. Az eljárás lényege, hogy megfelelő méretre vágott vázanyagokat (szöveteket) a megfelelően előkészített, formaleválasztóval kezelt sablonban, vagy a sérült munkadarabon kézzel impregnálják (ítatják át) a kettő-, vagy több komponensből (bázisgyanta, térhálósító, iniciátor, stb.) összekevert folyékony lamináló-gyantával a

<sup>32</sup> Gáti Balázs –Koncz Imre: Repülőgépek Szerkezete (Egyetemi tananyag elektronikus formában) Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében.

gyártási-, illetve javítási dokumentációban előírt erősítőanyagok felhasználásával. Ennél megbízhatóbb és szakszerűbb az a módszer, amikor az erősítőszöveteket, szálkötegeket a helyszínen kézi-, vagy gépi impregnálással nedvesítik át, legtöbbször fóliák között, melyeket ezt követően a kívánt méretre és alakra vágnak. Ezután a meghatározott rétegrend szerinti irányokban és rétegszámban helyezik a sablonokba, vagy a javítási területre, mindezt rövid időn belül, mivel a folyékony lamináló-gyantáknak a komponensek összekeverése után viszonylag kicsi a felhasználhatósági idejük („fazékidejük”) a térhálósodás elkezdődéséig. Emiatt ezzel az eljárással nagyméretű részegységek nem készíthetők megbízható minőségben, mert az gyártási folyamatnak (impregnálás, méretre vágás, rétegezés) be kell fejeződnie a lamináló-gyanta engedélyezett fazékidejének lejárta előtt, ellenkező esetben a polimer molekulaszervezete károsodik, és súlyos mértékben gyengülnek a szerkezet mechanikai tulajdonságai, ezért a fazékidő túllépése tilos! Az elkészült laminátum, illetve szendvicspanel fölé vákuumsomagot készítenek és az egész terméket bevákuumozzák, hogy a jó minőség eléréséhez szükséges erősítőanyag/beágyazó-anyag (mátrix) aránya a kívánatos értékhatáron belülré kerüljön. A vákuumos eljárással legyártott kompozit szerkezetek fajlagos mechanikai tulajdonságai jelentősen javulnak. A hőre keményedő polimer-mátrixú kompozit-szerkezetek (thermoset polimer matrix composites) fizikai paramétereinek javítására és hőmérséklet-tűrésének fokozására hőkezelést is szoktak alkalmazni, amire kétféle eljárás használatos:

- **emelt hőmérsékletű térhálósítás** (elevated temperature cure) amely azt jelenti, hogy a mátrixanyag térhálósítása típustól függően epoxigyanták esetében  $50\text{ C}^\circ$  és  $120\text{ C}^\circ$  közötti hőmérsékleten, rendszerint 0,5–4,0 óra alatt megy végbe. Ezen eljárás a gyártási időt is jelentősen lerövidíti, de a művelet során a magasabb minőség eléréséhez a munkadarabot a sablonban vákuum alatt kell tartani a térhálósodás befejeződéséig.
- **utóhőkezelés** (postcure) amelyet a mátrixgyanta kikeményedése, megszilárdulása után végeznek el szabályozható hőmérsékletű hőkamrában, kemencében. Ekkor a munkadarab „bevákuumozására” már nincs szükség, de a terméket a gyártószablonban kell hőkezelni a magas hőmérséklet okozta deformáció, torzulás elkerülésére.

A 29. ábra egy könnyű sportrepülőgép (Corvus Corone Mk-I.) felső szárnypaneljének gyártásán keresztül szemlélteti a nedves kézi impregnálás gyakorlati megvalósítását.



29. ábra Kompozit repülőgép sárkány építése nedves kézi impregnálással<sup>33</sup>

<sup>33</sup> A fotót Almási Balázs az egykori Corvus Aircraft Kft dolgozója készítette és bocsájtotta a rendelkezésre.

### Előimpregnált erősítőanyagok használata (Prepreg Method):

A modern közforgalmú és egyéb polgári célú repülőgépek, valamint a katonai repülőgépek csúcsmínőségű szerkezeti elemeinek gyártásához legelterjedtebben alkalmazott eljárás, melyhez előre impregnált erősítőszálakat, szöveteket (UD & fabric prepregs) használnak, melyeket erre szakosodott üzemekben automata gépsorokon készítenek. Az elkészült alapanyagot fagypontra ( $-12\text{ °C}$  és  $-18\text{ °C}$  közötti hőmérsékleten) kell tartani (és lehetőség szerint szállítani is) a felhasználásig. A „prepregekhez” használatos mátrixanyagok igen hosszú felhasználhatósági idővel rendelkeznek (általában 1–5 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 térhálósíthatóak, ezért minden esetben erre a kúrára magas hőmérsékletet kell biztosítani. A legelterjedtebbek az epoxi mátrixgyanták, a térhálósítás hőmérséklete alapján két csoportra oszthatók:

- alacsony kúrahőmérsékletű prepregek  $+65\text{ °C}$ – $(+130\text{ °C})$ ;
- magas kúrahőmérsékletű prepregek  $+130\text{ °C}$ – $(+220\text{ °C})$ .

Az epoxigyantákon kívül használnak még cianát észter-gyantákat, fenol-formaldehid gyantákat, melyek általában  $+110\text{ °C}$  továbbá poliimid- (PI) és biszmaleinimid (BMI) mátrixgyantákat is, ezek térhálósodása általában  $+200\text{ °C}$  és  $+350\text{ °C}$  közötti hőmérsékleten megy végbe. Ezen az eljárással készült termékeket minden esetben vákuum, illetve magasabb nyomás alatt kell térhálósítani. A mátrixgyantával előimpregnált erősítőanyagok (prepreg materials) kézzel történő alkalmazására mutat szemléltető példákat a 30. ábra.



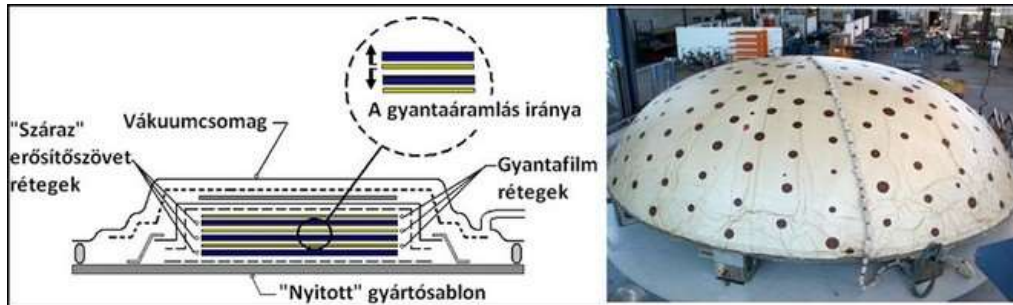
30. ábra Mátrixgyantával előimpregnált erősítőanyagok (prepreg materials) kézzel történő alkalmazása<sup>34</sup>

### RFI – Gyantafilm Infúziós impregnálás:

Ez a gyártási módszer, amelyet RFI-nek (Resin Film Infusion) ismer az angol nyelvű szakirodalom, nagyméretű alkatrészek gazdaságos gyártását teszi lehetővé. Az eljárás lényege, hogy a száraz erősítőanyagot és a szilárd egykomponensű gyantát (gyantafilm) egymásra rétegezik (előformázva a sablon felületén), majd bevákuumozzák. Ezt követően autoklávba vagy esetleg

<sup>34</sup> A képen Koncz Imre (szerző) lánya az ACE Aeroplex of Central Europe kft kompozit-műhelyében, 2009. júniusában üzemi gyakorlaton, a BMGE Gépészmérnöki Karának MSc hallgatójaként.

hőkamrába helyezik, ahol a vákuum hatására a magas hőmérsékleten folyékonyvá váló gyantafilmet magába szívja az erősítőanyag, így együtt térhálósodva képeznek kompozit-szerkezetet. Az eljárás lényegét, valamint az A380-as repülőgép hátsó nyomástartó falának gyártását a 31. ábra szemlélteti.



31. ábra az A380-as repülőgép hátsó nyomástartó falának gyártása RFI módszerrel<sup>35</sup>

### ATL - Automatizált prepreg szalagterítés (Automated Tape Laying):

A számítógép vezérelt szalagfektető berendezés UD prepreg szalagot terít a pozitív szerszámra a kívánt vastagságban és irányokban sokkal gyorsabban és pontosabban, mint a kézzel végzett prepreg laminálás, ezáltal jelentős átfutási idő rövidülést és költségcsökkenést eredményez. Az így összeállított elemek, részegységek mátrixanyagának térhálósítása vákuumcsomagban, magas hőmérsékleten, túlnyomásos autoklávban zajlik. Olyan nagyméretű munkadarabok készülnek ilyen eljárással, melyek sík-, vagy enyhén domború felületűek (32. ábra).



32. ábra Az ATL számítógép vezérelt szalagfektető berendezés „3D-s terítőfej” és munkaasztala<sup>36</sup>

### AFP - Automatizált szálfektető eljárás (Automated Fiber Placement):

Számítógép vezérlésű, hőre lágyuló-, vagy hőre keményedő mátrixanyaggal impregnált szálakkal dolgozó ipari robot által végzett gyártási mód. A robotkarral mozgatott terítőfej több csévestről göngyöli le a prepreg szálkötegeket, melyeket egyenletesen szétterítve a pozitív szerszám felületére fektet a betáplált program szerinti rétegszámban és irányokban. A hőre kemé-

<sup>35</sup> Gáti Balázs –Koncz Imre: Repülőgépek Szerkezete (Egyetemi tananyag elektronikus formában) Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében.

<sup>36</sup> Gáti Balázs –Koncz Imre: Repülőgépek Szerkezete (Egyetemi tananyag elektronikus formában) Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében.

nyedő mátrixgyantával impregnált erősítőszálakból készített munkadarabok térhálósítása rendszerint vákuumsomagban, 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. Az eljárás elvét és gyakorlati megvalósítását a 33. ábra mutatja be.



33. ábra AFP – Automatizált szálfejtető eljárás<sup>37</sup>

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] WAGENFÜHR: Holzatlas. Veb. Fahrbuchverlag Leipzig.1985.
- [2] BERGET ALFONZ: Léghajózás és repülés. M. K. Természettudományi Társulat. Budapest, 1911.
- [3] KENNETH MUNSON: Kampflugzeuge. Orel Füssli Verlag Zürich 1968.
- [4] JOHN BATCHELOR: A Repülés enciklopédiája. GABO 2004
- [5] GÜNTER SCHMITT: Junkers Bildatlas Motorbuch V. Stuttgart 1990.
- [6] FORTSCHRITTE DER LUFTWART: Bechhold V. Frankfurt 1929.
- [7] LANGSDORF: Sportfliegen Otto Maier V. Ravensburg 1935.
- [8] NAGYVÁRADI SÁNDOR-M. SZABÓ MIKLÓS-WINKLER LÁSZLÓ: Fejezetek a magyar katonai repülés történetéből. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1986.
- [9] DONALD H. MIDDLETON: Composite materials in aircraft structures (book) Issue date: 1990. Volume: 394 pages. (Az 1. és 2. ábrák forrása is)
- [10] AIRBUS: All Aircrafts Composite Engineering (Training Course:XSC3 CD) Ref. No: X4T07202. Issue date: March 27, 2008. Size: 601 MB. (A 4., 6., 7., 9.a., 10., 11. és 12. ábrák forrása is)
- [11] BOEING: Advanced Composite Repair for Engineers (Training manual ) Publication No: 7X7. Issue date: May 30, 1997. Volume: 280 pages.
- [12] ASM International: Composites (Engineered Materials Handbook) Issue date: 1987. Volume: 983 pages.
- [13] GURIT Co: Guide to Composites 2008. (Brochure) Doc. No: GTC-2-0708. Issue date: 2008. Volume: p.72
- [14] GÁTI Balázs –KONCZ Imre: Repülőgépek Szerkezete (Egyetemi tananyag elektronikus formában) Készült a TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 számú, „Egységesített Jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés” című projekt keretében. Issue date: 2012. Volume: 174 pages. (A képek nagyobb részének másodlagos forrása is egyben.)

<sup>37</sup> AIRBUS: All Aircrafts Composite Engineering (Training Course:XSC3 CD) Ref. No: X4T07202. Issue date: March 27, 2008. Size: 601 MB.