

Révész Tamás

EGYES KOMPOZITOK ÉS A BELŐLÜK KÉSZÜLT SZENDVICSSZERKEZETEK TÖNKREMETETELI FORMÁI

Bevezető

A szálerősítésű kompozitokat igen széles körben használják a közlekedési járművek (hajók, személyautók, stb.), sporteszközök gyártásához csakúgy, mint a repülőgépiparban. A kompozit anyagok kifejlesztését az iránti igény követelte meg, hogy az alkatrészek viselkedése eltérő legyen a tér különböző irányába, mivel a terhelések is csak a legritkább esetben azonosak a tér minden irányába. Egyes irányokba nagyságrendekkel nagyobb merevség szükséges, mint másokba, ezáltal a homogén és izotrop anyagokat a kitüntetett igénybevételi irány(ok)ba megerősítést igényelnek, ez azonban a kevésbé igénybevett irány(ok)ban többletanyag felhasználását jelenti, ami a szerkezet tömegét növeli. A repülőgépiparban e tömegnövekedés különösen előnytelen, hiszen adott maximális tömeg esetén a szerkezet tömegnövekedése a szállítható hasznos teher mennyiségét csökkenti, ezzel együtt az üzemeltetési költségeket növeli. A kompozitok olyan szerkezeti anyagok, melyek egyes alkotóelemei (a beágyazó- és az erősítőanyag) meghatározott feladatokat látnak el. A merevebb erősítőanyag általában húzásra vagy nyomásra terhelt, míg a kisebb szilárdságú mátrix elsősorban a terhelésátvitelt, másodsorban az erősítőanyaggal való együttműködést biztosítja és ezen felül külső védelmet nyújt az erősítőszálaknak mechanikai, környezeti hatásokkal szemben. Ez a hatékony funkciómegosztás megakadályozza a társult szerkezetek gyors, hirtelen tönkremenetelét. Azért előnyös polimer beágyazóanyagú kompozitokat alkalmazni, mert az azt alkotó részek igen eltérő tulajdonságúak lehetnek, de a teljes rendszer egyesítheti ezen eltérő tulajdonságokat. Ezen társult anyagok a repülőgépgyártásban is egyre nagyobb teret hódítanak, és nem nehéz megjósolni, hogy részarányuk fokozatosan nőni fog.

Mint minden használati eszköz, így a kompozitból készültek is szenvedhetnek sérüléseket, melyek hatással vannak szilárdsági tulajdonságukra, és ez különösen kritikus a repülőgépek esetében. A szerkezeti anyagok meghibásodása mindig valamilyen külső igénybevétel hatására történik, mely fizikai vagy kémiai eredetű lehet. Az összetett szerkezetek legveszélyesebb meghibásodása a törés, melyet mindig megelőz a repedéskeletkezés és – terjedés. A tönkremeneteli formák ismerete arról ad információt, hogy az alkatrésznek milyen

terheléseket kell elviselnie. Mielőtt ezek bemutatására rátérnék, a társult anyagok általános jellemzőit veszem sorra.

1. KOMPOZITOK

A kompozitok olyan mesterségesen előállított, inhomogén, több összetevőből álló anyagok, melyeket azért hoztak létre, hogy a különböző, társított anyagok eltérő, előnyös tulajdonságait ötvözzék egymással. A kombináció eredményeképpen nyert anyagok könnyebb és jobb felhasználhatóságot biztosítanak.

Tágabb értelemben kompozitnak nevezzük azon anyagokat, amelyekben legalább két összetevő létesít fizikai kapcsolatot egymással, ezért mivel kémiaiilag nem keletkezik új anyag, az anyagok jól elkülöníthetően, eredeti fizikai és kémiai tulajdonságaikat megőrizve vesznek részt a kapcsolatban.

Szűkebb értelemben olyan mesterséges úton előállított anyagokat sorolunk közéjük, melyben a szilárdsági és szerkezeti tulajdonságok irányonként eltérőek, azaz anizotróp tulajdonságú anyag keletkezik. A kompozit olyan szerkezeti anyag, mely egy mátrix (beágyazó) anyag és egy szerkezeti erősítő vagy más néven teherviselő részelem (pl. szál, szövet) kombinációjaként keletkezik.

A társult anyagokkal kapcsolatban legfontosabb kritérium, hogy legalább két összetevő fizikai kapcsolatot létesít egymással, és az így keletkező elemekben az alkotó részek előnyös tulajdonságai ötvöződnek. Dolgozatomban a polimer mátrix kompozitok sajátosságaival foglalkozok, melyek olyan többfázisú összetett anyagok, ahol a szívós mátrix és a nagyszilárdságú erősítőanyag közt kiváló adhéziós kapcsolat áll fent. A továbbiakban a kompozit kifejezés alatt ezen anyagokat értem¹.

Az epoxi, vinilészter és poliészter gyanták korlátozottan használhatók fel különböző szerkezetek előállításához, mivel a mechanikai tulajdonságaik kedvezőtlenek más szerkezeti anyagokkal, például a fémekhez képest. A könnyű formálhatóságuk ezzel szemben igen kedvező az összetett, bonyolult alakzatok kialakításához.

A megszilárdulva rideg mátrixokkal szemben például az üvegnek, aramidnak, bórnak igen nagy a húzó és nyomó szilárdsága, ám tömör formában nem jók a tulajdonságai. Ennek oka abban keresendő, hogy a terhelésnek kitéve a szerkezeten belül véletlenszerűen

¹ Ezen kívül léteznek fém-mátrix kompozitok, melyek egyre növekvő számban fordulnak elő az autóiparban, sokszor alumínium alapú mátrixok és szilikon karbid erősítőszálak alkotják, valamint kerámia-mátrix kompozitok, melyeket előszeretettel használnak különösen magas hőmérsékletnek kitett helyeken.

mikrorepedések keletkeznek, melyek az anyag repedését, törését eredményezik még azelőtt, hogy az elméleti szakadási pontjukat elérnék. Annak érdekében, hogy ez ne jelentsen problémát, ezeket az anyagokat nem tömb, hanem szál formában készítik, és a teherviselésben pedig szálkötegekbe rendezve vesznek részt. Igénybevétel hatására ekkor is megjelennek a mikrorepedések, ám így csak egy-egy szál esik ki a teherviselésből, mivel a szálak egymástól elkülönítve találhatók, így a mikrorepedések nem tudnak nagy területre áttérjedni. A szálaknak ilyen módon való kötegekbe rendezésével kedvezőbb tulajdonságú anyag kapható, mint maga a tömör anyag, ezen tulajdonság szálparadoxon néven ismeretes. A szál átmérőjének csökkenésével az üveg- és szénszálak szilárdsága jelentősen növekszik (főként a 10 μ m-nél kisebb tartományban).

Az erősítőanyagok (ami akár szál vagy szövet formájú, és többek között üveg, szén, grafit, aramid, bór alapú lehet) a mátrixgyanta, mint beágyazó anyag veszi körül, ennek feladata, hogy az erősítőelemnek határozott formát adjon. Az alkatrészt érő terheléseket ez a mátrix továbbítja az erősítőkre, és megvédi azokat a környezeti hatásoktól, a sérülésektől (pl. kopás), valamint javítja a szálak mechanikai tulajdonságát (pl. hajlítoszilárdság).

1.1.A KOMPOZITOKAT ÉRŐ TERHELÉSEK ÉS TÖNKREMENTELI FORMÁK

Az alkatrészek sérülései - így a kompozitból készültké is - alapvetően fizikai és kémiai okokra vezethetők vissza. Az első csoportba tartoznak a mechanikai, hő, elektromosság, sugárzás vagy időjárás okozta, míg az utóbbiba a vegyszerekkel kapcsolatos sérülések. A továbbiakban a mechanikai eredetű károsodásokkal foglalkozok².

A terhelések felvételében a beágyazó- és az erősítőrésszel eltérő szerepet játszik, ennek megismerésére sorba veszem a kompozitokat érő erőhatásokat, mely húzásból, nyomásból, nyírásból, hajlításból, valamint csavarásból származhat.

A szerkezet húzószilárdságát az erősítőszál mechanikai merevsége adja, mivel ez jóval nagyobb, mint a beágyazó anyagé.

A nyomószilárdság érdekében a beágyazó anyag tapadási képessége és merevsége a számottevő, mivel a beágyazó anyag feladata, hogy az erősítő szálakat egyenesen tartsa, és megakadályozza azok deformációját, kihajlását.

² Itt kell megjegyezni, hogy a későbbikben említésre kerülő vizesedés során egyes poliészter- és epoxigyanták hajlamosak a víz felvételére, ezáltal szilárdságuk jelentősen csökkenhet, és csökken az üvegesedési hőmérsékletük (T_g).

Hajlítás során a fent felsorolt három terhelés egyidejűleg lép fel. Terhelés során a külső rétegek húzásra és nyomásra dolgoznak, miközben a réteg egymáshoz képest nyíródik.

A nyíró igénybevétel a szomszédos rétegeket próbálja egymáson elcsúsztatni. Nyírás során a beágyazó anyag játssza a fő szerepet, mivel nemcsak jó mechanikai tulajdonságokkal, de a szálakkal való nagy adhézióval is rendelkeznie kell. Többrétegű kompozitok esetében a nyírással szembeni szilárdságok rétegek közötti nyírószilárdságnak (Interlaminar Shear Strength – ILSS) nevezik.

Az ILSS szintén kulcsszerepet játszik a csavaró terhelések felvételében is, ezen felül azonban a csavarószilárdság jelentősen javítható a rétegrend megfelelő kiválasztásával.

Összetett anyagok esetében az alábbi tönkremeneteli formák léteznek:

- szálszakadás (fiber break): akkor következik be, ha a fellépő húzás meghaladja a szál húzószilárdságát, általában erre méretezik az alkatrészeket. A tönkremenetek közül ez a legkedvezőbb, mert az lehetővé teszi az erősítőszál szakítószilárdságának teljes kihasználását. Ha a kompozit a szálszakadás bekövetkezése előtt tönkremegy, az azt jelenti, hogy valamilyen hiányosság fedezhető fel a szerkezetben, mint például a túlságosan rövid szálak vagy az erősítőanyag és a mátrix közötti tapadás elégtelensége.
- mátrixtörés (ply splitting): nyomás hatására a beágyazó anyagon belül repedések jelennek meg
- száلكihajlás (microbuckling): akkor következik be, ha a nyomóerő mátrixtörést követően is fennmarad, és az erősítőszálak kihajlanak.
- száلكihúzódás: kis anyagvastagság esetén megnő a felületi nyomás (pl. furat mentén a palástnyomás hatására), ennek következtében fellágyul a mátrix, a gyanta folyáshatár fölé kerül, és ezt követően nem képes a terhelést a szálakra átadni.

Míg az előző tönkremenetek rétegen belül zajlanak le, addig a rétegelválás (delamináció) rétegek között megy végbe. A rétegekkel merőleges irányú erőhatás következtében a rétegek közötti adhézió megszűnik, a rétegek elválnak egymástól. Ennek hatására a szerkezet szilárdsága jelentősen csökken. Közforgalmi repülőgépek egyik leggyakoribb sérülése a villámcsapás, mely szintén delaminációt okozhat.

A tönkremeneteli formák szorosan összefüggnek egymással, nyomás általi száلكihajlás esetén a szálvégek közepén jellegzetes vonalak keletkeznek, ám szorosan kapcsolódik a mátrixtöréshez és a delaminációhoz is.

Az 1. táblázat a fémek kifáradással szembeni viselkedését és sérüléssel szembeni toleranciáját hasonlítja össze a kompozitokéval.

A fémalkatrészek egyik jellegzetes tönkremeneteli formája az anyagfáradásos törés. Ismétlődő igénybevétel hatására mikrorepedés keletkezik az anyagban, a továbbra is fennálló terhelés hatására a repedés továbbterjed, és makrorepedéssé nő. A törés akkor következik be, amikor a szerkezet hasznos keresztmetszete annyira lecsökken, hogy már statikusan sem tudja a terhelést elviselni. Az anyag tönkremenetele tehát olyan időben ismétlődő terhelés hatására következik be, amely statikus terhelésként nem okozna feltétlenül tönkremenetelt.

Tulajdonság	Fémek	Kompozitok
Feszültség-alakváltozás viselkedés	Tönkremenetelkor kis fajlagos nyúlás	Tönkremenetelkor nagy fajlagos nyúlás
Környezeti hatások	Nem érzékeny	Páratartalom és hőmérséklet hatással van
Tönkremenetel oka	Fáradás, korrózió, feszültségkorrózió	Külső tárgy általi hatás, gyártási hiba
Kritikus sérülés fajtája	Törés	Delamináció
Kritikus sérülés oka	Húzás	Nyomás
Tönkremenetel előtti hibafelderítés	Általában vizuálisan	Roncsolásmentes vizsgálatok (vizuálisan nem felmérhető)
Tönkremenetel előrejelzése	Jó	Rossz
Tapasztalatok	Széleskörű	Nagyon korlátozott

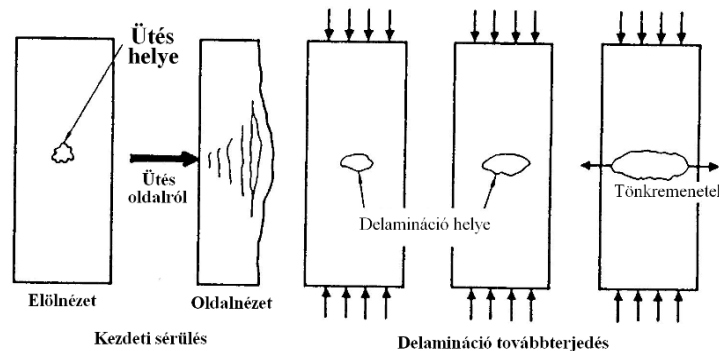
1. táblázat: Fémek és kompozitok összehasonlítása
Forrás: Michael C. Y. Niu: Composite Airframe Structure [10] figure 7.4.1

A kompozitokról általánosságban elmondható, hogy a fémeknél sokkal ellenállóbbak az időben ismétlődő húzó igénybevételekkel szemben. Ugyanakkor nagyon kevés olyan alkatrész van, amely csak tiszta húzást szenved el, a gyakorlatban sokszor nyomással, nyírással, csavarással párosul, és ez utóbbiak elviselése jelenti a kihívást a szerkezetek számára. Különösen igaz ez akkor, ha már előzőleg külső hatás nyomán sérülést szenvedtek, mint azt az 1. ábra is mutatja.

Kompozitokban a kifáradási vagy időtartam szilárdság elvesztése okozta törés a következő lépéseken keresztül zajlik le:

- repedéskeletkezés: feszültségkoncentráció (például az alkatrészen belül található légbuborékok környezetében) repedéseket okozhat, ha a beágyazó anyag belső adhéziója lecsökken, vagy az erősítőszál folytonossága megszakad.

- törésterjedés: a fémekben keletkező egy mikrorepedéssel ellentétben több is keletkezik, melyek folyamatosan nőnek és terjednek a beágyazó anyagban.
- húzó kifáradás: ez magában foglalja a törés kialakulását és terjedését is, akárcsak a fémek esetében. Amint a korábban keletkezett mikrorepedések összeérnek, a beágyazó anyag nem képes a terhelést a szálakra átadni, és bekövetkezik a törés.
- végső tönkremenetel: kompozitoknál a fémekkel szemben nem tiszta a töretfelület, hanem a szál és a mátrix sérülése, száلكihúzódnás, rétegek deformációja jellemzi.

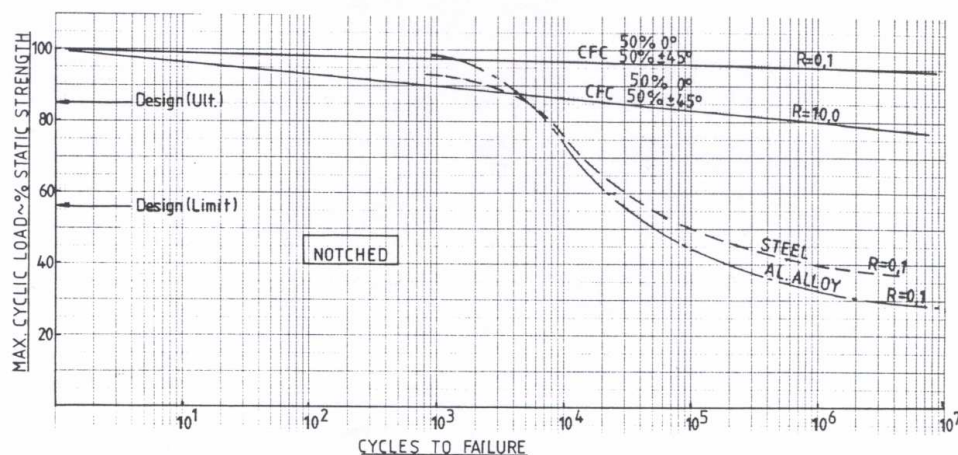


1. ábra: Delamináció továbbterjedése ismétlődő nyomóigénybevétel hatására
Forrás: Michael Chun-Yung Niu: Composite Airframe Structure [10] figure 7.4.2

Repülőgép-szerkezeteknél a fent leírt szilárdságvesztési folyamat a gyakorlatban nem zajlik le, mivel a gyártók által megadott szolgálati idő a törés előfordulását jelentősen megelőzi. A jelenlegi tervezési gyakorlatban nem szerepel az ismételt terhelésre való méretezés, sőt, kompozitok kifáradásával jelenleg nem is tudunk számolni. Az időtartam szilárdságot jelenleg törésmechanikai modellekkel számíthatjuk, ez a számítási módszer meglehetősen kiforrotlan a fémek modelljeihez képest. A társult anyagok kifáradási jellemzőit megadó modell egyelőre nem létezik, csakúgy, mint a fémekéhez hasonló határfeszültségeket tartalmazó táblázatok (pl. Wöhler-féle anyagkifáradási görbe, Smith-féle biztonsági diagram) sem. Sérülésmentes laminátumok esetében nem is a kifáradás okozza a tönkremenetelt, sőt, társult anyagok esetében az terhelésszám növekedésével korántsem esik olyan mértékben a maximális feszültség értéke, mint fémeknél. A 2. ábrán látható kifáradási ábrán a kísérletbe vont szénszál-erősítésű kompozit próbatestek 0,1 %-ánál ($R=0,1$ – reliability) szinte alig történt változás, és a kompozit próbatestek 10%-a is jelentősen túlteljesítette az acél és alumínium próbatestek 0,1 %-a által kibírt feszültséget. Empirikus vizsgálatok alapján az Airbus Industry repülőgépgyártó vállalat méretezési alapelvei között lefektette, hogy a kompozit szerkezetek nem kifáradás érzékenyek. Ugyanakkor amint az a fenti ábrán látható, külső sérülés hatására

jelentősen változik a szerkezet terhelés felvevő képessége, ezért célszerű megvizsgálni, milyen folyamatokon keresztül hat a kompozit szerkezetre a kifáradás.

Az Airbus Industry által használt szilárdsági méretezési eljárás alapjául a tapasztalati úton nyert földi és légi statikus, valamint a manőverekből, széllelésből, koncentrált külső hatásokból származó dinamikus igénybevételek szolgálnak. Ezek alapján határozzák meg a szerkezeti elemek terhelési tényezőit és terhelési határait, melyekből a statikus szilárdsági követelmények származnak. A maximális terhelést a terhelési határ biztonsági tényezővel felszorozott értéke adja, amit a biztonság fokozása miatt egy újabb tényezővel szoroznak. Erre a terhelésre történik a méretezés. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy ha az alkatrész törése a 120 000-dik ciklusnál következik be, a gyártó 48 000 szolgálati ciklust engedélyez³.



2. ábra: Szénszál erősítésű kompozit és fémek kifáradásának összehasonlítása
Forrás: Airbus Composite Engineering Course [15]

Az erősítőszálak sokkal jobb kifáradás-tűréssel rendelkeznek, mint a beágyazó anyagok, ezért az ilyenfajta szilárdságvesztés elkerülése érdekében a szálak dominanciája kívánatos. Ez a valóságban a minél hosszabb erősítőszálakkal valósítható meg. Egyirányú szövetek esetében az anyagfáradással szembeni ellenállás kimagasló, mivel a szálirányban ható időben változó igénybevételek a beágyazó anyagot nem terhelik túl.

A külső mechanikai hatások ugyanakkor jelentős kockázatot jelentenek a kompozitok időtartam szilárdságával kapcsolatban, mivel még egy viszonylag kis energiájú ütés is hajlamos delaminációt okozni. Egy elejtett szerszám előfordul, hogy a szerkezet felszínén semmilyen vagy nagyon csekély nyomot hagy, ám elképzelhető, hogy az így kialakuló mikropredések és/vagy a delamináció okozzák később az alkatrész tönkremenetelét.

³ Airbus XSC3 Airbus Composite Engineering Course [15], Composite Structure Design – Design Protection

Az 1. ábra jól szemlélteti, hogy a társított anyagok milyen érzékenyek a külső mechanikai hatásokra. A repülőgépeken alkalmazott kompozit alkatrészeknek ezért megfelelő sérülés toleranciával (damage tolerance) kell rendelkezniük, nem szabad azonban elfeledkezni a könnyű építés elvéről sem, azaz a minimális tömeg mellett a lehető legnagyobb terhelésvétel képességről, és a szerkezeti hatékonyságról sem, melybe olyan szempontok tartoznak, mint a könnyű karbantarthatóság, javíthatóság, valamint a költséghatékony gyártás és üzemeltethetőség.

2. KOMPOZITOK SZILÁRDSÁGA

Az előzőekből látható, hogy a kompozitokat alkotó beágyazó anyagnak és az erősítőszálaknak együttesen kell a lehető legjobb tulajdonságot adni, hiszen ha csak az egyik résztvevő anyag is „hibázik” az igénybevétel során, a szerkezet tönkremegy. A részek tehát nem egyszerűen egymás mellett helyezkednek el, hanem szoros mechanikai kapcsolatot alkotnak, hiszen csak így képesek a legjobb együttes tulajdonságot nyújtani.

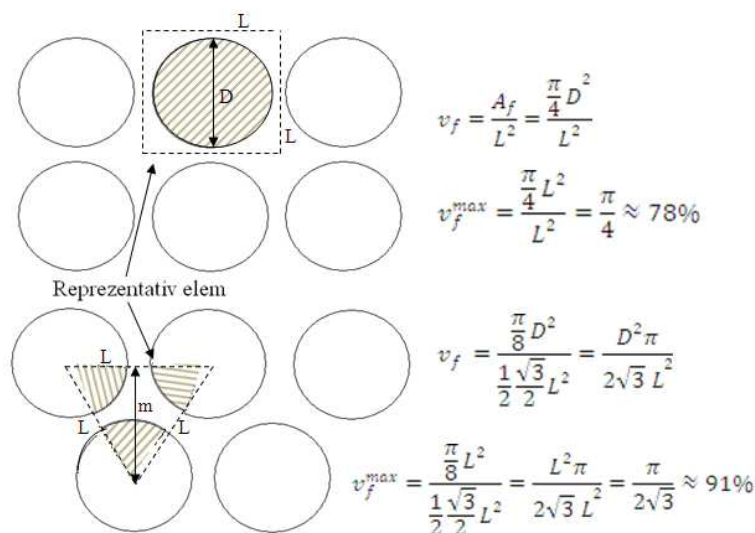
Ezért különösen fontos annak ismerete, hogy az összetevők jellemzői hogyan járulhatnak a kompozit anyag szilárdságához. A kompozit laminátok szilárdsági tulajdonságait az alábbi tényezők határozzák meg:

- a beágyazó anyag tulajdonságai
- az erősítő szál tulajdonságai
- a beágyazó anyag és erősítő szál aránya (szálhányad - Fibre Volume Fractions (FVF))
- az erősítő szálak geometriája és száliránya.

A szálhányadot (v_f) a gyártási folyamat határozza meg, ám az is közrejátszhat, hogy a szálak milyen beágyazó anyagban vannak, és, hogy milyen elrendezésben szerepelnek a kompozitban. Az alábbi ábrán a szálhányad elméleti maximumai láthatók különböző szálelrendezés esetén.

Az erősítőszálak mechanikai tulajdonságai sokkal kedvezőbbek, mint a beágyazó anyagéi, minél nagyobb a szálhányad, annál közelebb lesz a keletkező kompozit anyag mechanikai szilárdsága az erősítő száléhoz. A valóságban közel sem lehet az elméleti szálhányad maximumát elérni, hiszen, mint az a 3. ábrán látható, a maximális szálhányad feltétele, hogy $L=D$, azaz, hogy a szálak mindkét szálelrendezés esetén egymáshoz érjenek, ami a valóságban igen nehezen valósítható meg. Ezen kívül a laminátum külső részén mindenképpen szükséges a többlet gyanta, mivel a szálak a gyanta védelme nélkül igen sérülékenyek. Ezzel együtt a repülőgépiparban alkalmazott magas minőség, valamint a más

iparágakhoz képest pontosabb, kifinomultabb gyártási eljárásokkal akár 70%-os szálhányad is elérhető. A szilárdság ugyanakkor az erősítő- és beágyazóanyag adhéziójával szorosabb kapcsolatot mutat, mint a szálhányaddal. Nagy szálhányad esetén a beágyazóanyag nem képes a feladatát (terhelésátvitel, szál védelem) maradéktalanul ellátni, így a szilárdság csökken.



3. ábra: Elméleti maximális szálhányad különböző szálelrendezés esetén

Ha ismertek az összetevők mechanikai tulajdonságai, akkor a kompozit húzás irányú szilárdságát egyszerű keverési szabállyal $E_1 = E_f v_f + E_m v_m$, míg a húzás irányára merőleges szilárdságot fordított keverési szabállyal: $E_2 = 1/E_f v_f + 1/E_m (1 - v_f)$ kapjuk. Ezen képletek akkor igazak, ha a kompozitban a gyártás során nem keletkeznek rendellenességek (pl. légbuborékok), melyek rontják a mechanikai tulajdonságokat.

2.1. BEÁGYAZÓ ANYAG

Ezek olyan műanyagok, amik az erősítőanyagot körülveszik. A kompozit mátrixát (mint az előzőleg látható volt) igen változatos anyagok és részelemek képezhetik, mint például a fémek és azok ötvözetek, polimerek, vagy éppen keramikus anyagok. A nem természetes állapotban előforduló, azaz ember által gyártott gyantákat összefoglaló néven szintetikus gyantáknak nevezzük. Ezeket két fő csoportra bontjuk: léteznek a hőre lágyuló (Thermoplastic) és a hőre keményedő (Thermosetting) gyanták.

A Thermoplastic anyagok hő hatására lágyulásnak indulnak, és a hőhatás megszűnése után a lehűlés során ismét visszanyerik keménységüket. Ez a folyamat tetszőleges számban ismétlődhet anélkül, hogy észlelhető és figyelembe veendő hatás jelentkezne az anyagok szerkezeti vagy mechanikai tulajdonságainak tekintetében. Hőre lágyuló polimereket

általában rövid (1-5 mm hosszú) szálakhoz fröccsöntés vagy extrúzió során használnak mátrixanyagként.

A Thermosetting anyagok egy irreverzibilis kémiai reakció eredményeként folyadék halmazállapotból térhálós szerkezetű szilárd halmazállapotba kerülnek, és miután ez a folyamat lezajlott, többé már nem olvaszthatók meg, habár a hőmérséklet változtatása jelentősen befolyásolja mechanikai tulajdonságaikat. A térhálósodás során az agyag természetétől függően keletkezhet illékony melléktermék (léteznek olyan hőre keményedő gyanták, ahol nincs ilyen típusú melléktermék-képződés). A már végbement reakciót követően a gyanta nem vesz fel ismét folyékony halmazállapotot. Létezik azonban egy üvegesedési hőmérséklet (Glass Transition Temperature - T_g), melyet elérve jelentős változások következnek be az anyagi tulajdonságokban. Ez az üvegesedési hőmérséklet egy igen fontos jellemzője a gyantának, hiszen ez határozza meg, hogy milyen hőmérsékleti viszonyokat képes a kompozit szerkezet elviselni. Az üvegesedés tulajdonképpen azt jelenti, hogy a gyanta egy rugalmas fázisba lép, melynek hatására nem keményedik meg, hanem a benne lévő molekulák terhelés hatására változtathatják helyüket. Az üvegesedési hőmérséklet széles körben változik a gyanta sajátosságainak függvényében. Ide tartozik a kikeményedéshez alkalmazott hőmérséklet, és az adalékanyagok adagolási aránya, jelentősen csökken az üvegesedési hőmérséklet, ha a gyanta nagy mennyiségű vizet köt meg a térhálósodási folyamat során. A gyanta vízmegkötését vákuum és magas hőmérséklet alkalmazásával lehet megakadályozni.

Minden a kompozitoknál használt gyantának meg kell felelnie a következő követelményeknek:

- jó mechanikai tulajdonság: igen fontos, hogy a gyanta a terhelés hatására hasonló fajlagos nyúlást szenvedjen, mint az erősítő szál, hiszen csak így tudják a maximális terhelést elviselni.
- jó tapadási képesség: a gyanta és az erősítő szál közötti jó tapadás garantálja, hogy a gyanta a terhelést hatékonyan tudja az erősítő szálnak átadni.
- megfelelő keménység: a terhelés során a mátrixban keletkező repedések, törések annál kevésbé terjednek tovább, minél keményebb a gyanta. Általánosságban elmondható, hogy minél annál keményebb a gyanta, minél nagyobb deformációt képes elviselni mielőtt eltörik.
- környezet hatásainak való jó ellenállás: a gyanta ezen tulajdonsága biztosítja a kompozit hosszú „szolgálati idejét”.

Repülőipari alkalmazhatóságukat tekintve legelterjedtebbek a poliészter gyanták és az epoxigyanták, ha azonban a körülmények megkívánják hőálló gyanták használatosak.

A kompozitokhoz felhasznált poliészter gyanták telítetlen poliészterek. Háromkomponensű rendszert alkotnak a térhálósító anyaggal és a reakció beindításához szükséges iniciátorral. A poliészter és a térhálósító rendszerint már előre össze van keverve, ám ez az elegye önmagában nem indítana be keményedési reakciót – ehhez a teljes gyanta mennyiségéhez viszonyítva néhány százaléknyi mennyiségű iniciátor szükséges. Az iniciátor mennyiségével gyorsítani, vagy lassítani lehet a telítetlen poliészterek kötését, csakúgy, mint a munkahőmérsékletet, melyet a munkadarab mérete és alakja, illetve a telítetlen poliészter típusa határoz meg.

A poliészter gyanták jól felismerhető szaga évekkal a kikeményedésük után is megmarad. A legtöbb ilyen gyanta nyúlós állagú, színük fakó. Tárolására hűvös, környezeti hatásoktól és fénytől mentes hely szükséges. Amennyiben ez biztosított, úgy eredeti csomagolásban általában 3 - 6 hónap tárolási idő engedélyezett szobahőmérsékleten, vagy az alatti hőmérséklettartományban.

Bár a poliészter gyanták az utas- és teherszállító-, valamint a katonai repülőgépek gyártása során már nem alkalmazott anyagok, de továbbra is nagy jelentőséggel bírnak a könnyű- és vitorlázó repülőgépek esetében.

Az utas- és teherszállító repülőgépek esetében szinte kizárólag, míg a sportrepülőgépek gyártása során mind gyakrabban alkalmazzák az epoxi alapú gyantákat. Ezek térhálósodása a poliészter gyantákhoz hasonlóan hőfejlődéssel jár, és mivel meleg hatására a folyamat reakcióideje lecsökken, nagyobb mennyiségű gyanta (400-500 gramm) bekeverése esetén rendkívül lerövidül a fazékidő. Viskozitásuk skálája is igen változó a híg folyóستól a sűrű gyantáig, ezt a képződött láncok hossza határozza meg. Hígításuk csak speciális oldószerrel történhet, ami beépül a gyanták saját szerkezetébe. Egyéb hígítószer alkalmazása gátolja a gyanták teljes kikeményedését, és akár buborékképződést is eredményezhet, ami könnyen rétegszétváláshoz vezethet. Szakítószilárdsága a szálerősítéstől függően 100-1 000 MPa lehet. Hevítéskor megindul az üvegesedés, ezáltal maga a gyanta gumyszerű állagot vesz fel, ami igen komoly szilárdságcsökkenést eredményez.

A gyantákat nem alkalmazzák tisztán, hanem általában többféle adalékanyaggal elegyítik, javítva ezzel mechanikai tulajdonságaikat. Ilyen alkalmazott adalék lehet az égésgátló, a

különböző töltőanyagok (például a viszkozitás befolyásolására), vagy többek közt a flexibilizátorok (az anyag szívósságának biztosítására).

Általánosságban mind a poliészter, mind az epoxigyanták esetében alkalmazható az a hüvelykujj-szabály, hogy a hőmérséklet 10 °C-os növelése a teljes kikeményedési időt felezi. Az emelt hőmérsékleten történő kikeményedés ezen felül azzal az előnnyel is jár, hogy a végső mechanikai tulajdonságok kedvezőbbek lesznek, sőt, sok gyanta esetében hőkezelés nélkül nem érhető el a maximális szilárdság.

2.2. ERŐSÍTŐANYAGOK

Ezek szerepe az, hogy biztosítsa a kompozittól megkövetelt szilárdságot és merevséget. Repülőgépiparban általában szál jellegű anyagok kerülnek alkalmazásra - de léteznek ettől eltérő konstrukciók is, főleg a kisrepülőgép gyártásban. A szálas erősítés alkalmazását elsősorban a kompozit anyagok azon sajátossága indokolja, hogy a terhelés kitüntetett irányába biztosítson kiemelkedő szilárdságot és merevséget (anizotrópia), ami ezzel az erősítéssel jól kivitelezhető.

A szálas erősítést a fajlagos felületnövelés szükségessége indokolja. A terheléseknél látható volt, hogy a kompozit anyag tulajdonságaira döntő fontosságú az erősítőanyag és a mátrixanyag közti jó adhéziós kapcsolat, melyet az erősítőszál minél nagyobb fajlagos felületével lehet biztosítani. Adott térfogathoz viszonyított fajlagos felület felírható

$$\frac{A}{V} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot \pi + 2 \cdot r \cdot \pi \cdot l}{r^2 \cdot \pi \cdot l}$$
 formában, ahol l a szál hosszúsága, r a szál átmérője. Ebből kapjuk, hogy
$$\frac{A}{V} = \frac{2}{l} + \frac{2}{r},$$
 ennek a kifejezésnek keressük a maximumát. Ha l nagyobb, mint r , akkor hosszú szálakról beszélünk, míg ellenkező esetben lapos korongok lennének. Az anizotróp tulajdonság az első esetben érhető el, azaz a lehető legkisebb átmérőjű erősítő szállal.

A szálak szilárdsága alapvetően meghatározza a kompozit szilárdságát. A szerkezeti műanyagokban különösen fontos a hosszú szálak alkalmazása, mert minél hosszabb a szál, annál erősebb a belőle készült szövet is. Speciális csoportot alkotnak a whiskerek, amelyek viszonylag rövid, de nagy merevségű szálak.

A leggyakrabban felhasznált erősítők az üveg, szén vagy aramid alapú szálak. Ezek jellemző tulajdonságait a 2. táblázatban a hasonlítja össze.

Az erősítő szálak száliránya igen fontos a keletkező kompozit mechanikai tulajdonságai szempontjából, mivel az erősítő szálak a legnagyobb igénybevételt szálirányban (húzás-nyomás) képesek felvenni, miközben a nyírást meglehetősen rosszul viselik. Ez vezet a kompozitokra jellemző anizotróp tulajdonsághoz, azaz az izotróp anyagokkal szemben a kompozitok irányonként eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek⁴. A társult anyagok ezen tulajdonsága mind a tervezés, mind a javítás során különösen fontossá teszi az alkatrészt érő terhelések nagyságának és irányának minél pontosabb ismeretét, hiszen csak ennek alapján méretezhetünk megbízhatóan. A pontos igénybevétel alapján megtervezett kompozit szerkezet igen kedvező tömeg tulajdonsággal bír, hiszen csak a fellépő terheléseket elviselő anyag kerül beépítésre, és ez az, ami a kompozitok igazi előnyét jelenti az izotróp anyagokkal (pl. a fémekkel) szemben.

Tulajdonság	Aramid	Szén	Üveg
Nagy húzó szilárdság	B	A	B
Nagy húzási modulus	B	A	C
Nagy nyomó szilárdság	C	A	B
Nagy nyomó modulus	B	A	C
Nagy hajlító szilárdság	C	A	B
Nagy hajlító modulus	B	A	C
Nagy ütőszilárdság	A	C	B
Nagy ILSS	B	A	A
Kis sűrűség	A	B	C
Nagy fáradási ellenállás	B	A	C
Tűzállóság	A	C	A
Hőállóság	A	C	B
Elektromos szigeteltség	B	C	A
Kis hőtágulás	A	A	A
Alacsony költség	C	C	A

2. táblázat: Aramid-, szén- és üvegszál összehasonlítása
(A – jó B – közepes C – kedvezőtlen)

Szövési irányokat tekintve léteznek az egyirányú (Unidirectional), két-, három- vagy többirányú (Biaxial, Triaxial, Multiaxial) és a térbeli szövetek.

Az egyirányú szalagokat lapos, egymás mellé fektetett szálak alkotják, melyeket impregnáló gyanta tart össze. A fő teherviselő irány, amely irányban a legnagyobb a szövet szakítószilárdsága, a szalag hosszának irányába, azaz a láncirányba mutat. Így jelentős igénybevételt csak ilyen irányú terhelés esetén képes elviselni. Keresztirányban – vetülék

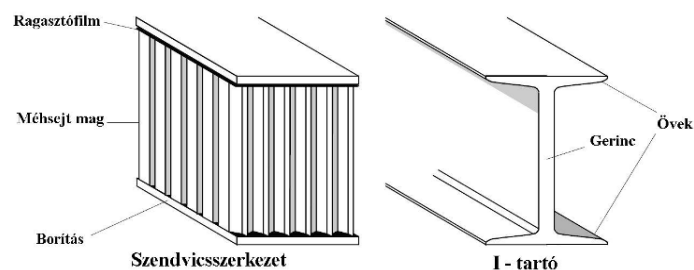
⁴ Ezt a tulajdonságok a korábban bemutatott keverési és fordított keverési szabály is tükrözi.

irányban – is futnak vékony (üveg vagy nylon) szálak, de ezek leginkább csak az anyag könnyebb kezelhetősége érdekében. Általában ezt a szövémódot prepregeknél alkalmazzák.

A két- vagy többirányú szövetek adott számú egymásra fektetett egyirányú szalagokból épülnek fel úgy, hogy a rétegek hossz tengelye szöget zár be egymással. Egymáshoz valamilyen gyantával vagy varrással (varrva hurkolt) vannak erősítve.

3. SZENDVICSSZERKEZETEK

Az eddigiekben monolitikus, azaz csak beágyazóanyagból és erősítőből álló szerkezetekről volt szó. A műszaki életben azonban nem a húzással, hanem leginkább hajlítással találkozhatunk, mint fő igénybevétel, ezért is született meg – a természet analógiájára pl. csont – ez a merevítés. A szendvicsszerkezetet két, egymással párhuzamos, sík vagy görbült nagy szilárdságú lemez között elhelyezkedő kisebb szilárdságú, könnyebb anyag alkotja. Ez a szerkezeti forma nem csak kompozitokkal valósítható meg, hiszen a viszonylagosan egyszerű gyártási technológia, és a szerkezetekkel elért nagy hajlítómerevség miatt már jóval a kompozitok megjelenése előtt, a II. világháború idején is használták. A felhasználható anyagok sokszínűsége, változatossága miatt a szendvicsszerkezetek felhasználhatóságának köre igen tág.

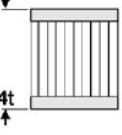


4. ábra: Szendvicsszerkezet és I-tartó

Forrás: Hexcel: Honeycomb Sandwich Design Technology [13]

A terhelés felvétele az I-tartó analógiájára történik. főleg hajlításra igénybevett lemezek szélső rétegeiben ébredő. A mag és. A három rétegből álló mechanikai egység tehát nagy hajlító merevséggel rendelkezik. A hajlítás semleges szálától távol lévő borítás – akár csak a tartó övei – nagy húzó- ill. nyomóerőket képes felvenni. Ezzel szemben a semleges réteg környéke – a tartó gerincéhez hasonlóan – sokkal kisebb mértékű nyírásnak van kitéve, ezért ezek szilárdsága, és ezzel együtt sűrűségük is jóval kisebb, mint a borításé. Ez a merevítési fajta különösen akkor előnyös, ha a borítóréteg rugalmassági modulusa kicsi, és önmagában nem képes a fellépő terheléseket felvenni, azaz a monolitikus szerkezet nem lenne eléggé ellenálló. A falvastagság növelése a tömeget és a költségeket is megnövelné. A

szendvicsszerkezetekben a maganyagok a borítórétegeket egyforma távolságban tartják egymástól, így viszonylag kis tömegnövekedéssel érhető el jelentős inercia-növekedés, ami a

	Tömör laminát	Magréteg - 1t	Magréteg - 3t
			
Hajlító merevség	1.0	7.0	37.0
Hajlító szilárdság	1.0	3.5	9.2
Tömeg	1.0	1.03	1.06

3. táblázat: A szendvicsszerkezet mechanikája
Forrás: Honeycomb Sandwich Design Technology [13]

A hajlító merevség szempontjából azonban – akárcsak a monolitikus szerkezeteknél – különösen fontos a borítás és a mag közötti adhézió, és ez fokozottan igaz akkor, ha a szendvicsszerkezet nyomásra van igénybe véve. Ilyenkor a fedőréteg elválhat a magtól, ezért az ilyen szerkezeteket kihajlásra kell méretezni.

	Monolitikus szerkezet	Szendvicsszerkezet
Előnyök	takarékosabb üzemeltetés alacsonyabb gyártási költség nagyobb energiaelnyelő képesség nincs vizesedési probléma lehetséges csavarozásos javítás	kedvező szilárdság/tömeg arány megfelelő csavarási szilárdság kiváló hőszigetelő kiváló akusztikai csillapító tulajdonságú
Hátrányok	szendvicsszerkezethez képest nagyobb tömeg szendvicsszerkezethez képest alacsonyabb szilárdság/tömeg arány csavarással és nyomással szemben megerősítést igényel	érzékeny a vízbeszivárgásra külső hatásokkal szemben igen érzékeny nagy gyártási költség csavarozásos javítása nem javasolt

4. táblázat: Kompozit szendvicsszerkezetek és monolit szerkezetek összehasonlítása
Forrás: Airbus XSC3 - Composite Engineering Course [15]

A maganyagok ezen kívül kiválóan alkalmasak a nedvesség-kondenzáció elleni védekezés egyik eszközeként, illetve járulékosan rezgés- és zajcsillapítóként valamint hőelvezetőként is használatosak. A maganyag természetes és szintetikus anyagokból készített kis sűrűségű anyag lehet, a repülőgépiparban manapság két fő típusuk, a töltőhabok és a cellás szerkezetű magok, a méhsejtek találhatók meg.

3.1. SZENDVICSSZERKEZETEK TÖNKREMENTELI FORMÁI

Szendvicsszerkezetek tervezésekor az alábbi tönkremeneteli formák elkerülését kell figyelembe venni.

- Borítás nyomó tönkremenetele: a borításnak és a magnak képesnek kell lennie a húzó, nyomó és nyíró igénybevételek felvételére, a borítás és mag közötti adhéziónak pedig közvetíteni kell a két réteg közötti igénybevételt.
- Túlzott lehajlás: akkor szenved el a szendvicsszerkezet, ha nem megfelelő hajlító és nyírószilárdsággal rendelkezik. Ennek oka a mag és a borítás nem megfelelő adhéziójában, valamint a nyomásra nem megfelelően méretezett borításban keresendő. A túlzott lehajlás következménye lehet egy időben nem észrevett borítás-tönkremenetelnek.
- Panel kihajlás: akkor következik be, ha nem elég vastag a mag vagy a nyírási modulus kis értékű a nyomóerőhöz viszonyítva.
- Hullámosodás: a panel kihajláshoz hasonló körülmények között következik be. Kis vastagságú mag vagy kis értékű nyírási modulus esetén a nyomóerő hatására elnyíródik a maganyag.
- Borítás begyűrődése: akkor következik be, ha a borítás nyomási modulusa vagy a maganyag nyomószilárdsága nem elegendően nagy a szerkezetet érő nyomóerőhöz viszonyítva.
- Cellán belüli kihajlás: ez a tönkremenetel akkor alakul ki, ha adott borításanyaghoz képest a maganyag cella mérete nem elég kicsi, így lehetőség van rá, hogy cellán belül a borítás kihajoljon.
- Lokális benyomódás, horpadás: a maganyag nyomó szilárdságának megfelelően nagynak kell lenni, hogy ellenálljon a szendvicsszerkezet borítását ért külső dinamikus hatásnak (ütés). A lokális benyomódás sokszor delaminációval jár együtt, mivel ütés hatására a rétegek elválhatnak egymástól.
- Ragasztás felválás: a méhsejt és a borítás közti adhézió megszűnik, a borítás elválk a méhsejttől, és a szerkezet szilárdsága jelentősen csökken.
- Méhsejt vizesedés: a vékony borítású szendvicsszerkezetek (kompozit és lemezes egyaránt) tipikus sérülése, mely több okra vezethető vissza. A kompozit anyagok környezettel szembeni ellenállása igen kedvező, ugyanakkor üzemeltetés során a szerkezeten belüli víz megjelenés nagy károkat okozhat.

A kompozit szerkezetek esetében a gyanta nem alkot egységes felületet, apró rések vannak benne, melyekbe beszivárog a folyadék. Mivel a repülőgép környezeti hőmérséklete a különböző magasságokon eltérő, a beszivárgott víz megfagy, ez növeli a rés nagyságát, ezáltal még több víz szivárog be, ami újból megfagy, és a folyamat ismétlődése nyomán a rés egészen a méhsejtig elér. Ezt követően a méhsejt kezd vízzel feltöltődni.

A másik ok az lehet, hogy a nagysebességű repülés során keletkező nagy torlónyomás a levegőben található vízmolekulákat a vékony lemezen vagy a kis vastagságú (3-4 rétegű) laminátumokon keresztülréseli⁵.

Ez utóbbi tönkremenetel az, amely leggyakrabban okoz súlyos sérülést a közforgalmi repülőgépeken. A beszivárgó víz ugyanis súlyos szerkezeti károkhoz vezet, melyek jelentősen csökkentik a szerkezet szilárdságát. A szendvicsszerkezet mechanikai tulajdonságai nagyrészt a méhsejt és a borítás közötti kapcsolat erősségétől, annak állapotától függ. Jelenleg is folynak olyan repülőgép üzemeltetők által végzett kísérletek, melyek a borítás-méhsejt adhézió időtartam szilárdságának változására irányulnak. A már kitérhálósodott ragasztófilm az üzemeltetési hőmérséklettől, légnedvességtől függően elszíneződhet, és a hosszú, több hónapon át tartó vizsgálatok célja, hogy a ragasztófilm színe mennyire megbízható információt ad a szerkezet teherbíróképességéről. Egy ehhez hasonló vizsgálatot jól szabályozott környezetben lehet csak végrehajtani, ragasztónként külön színskála felállítása szükséges. Az így meghatározott spektrum aztán nagy segítségére lehet az üzemeltetőknek, akik így egyszerű, roncsolásmentes vizsgálat során győződhetnek meg a szerkezet mechanikai képességéről.

Befejezés

Napjainkban mind nagyobb és nagyobb teret hódítanak a kompozit anyagok a repülőiparban, hiszen ezen a területen különösen nagy előnnyel jár az anizitrop anyagok használata. A 2007-ben forgalomba állított Airbus A380 típusú repülőgép sárkányszerkezetének 26%-át adják kompozit anyagok (főleg szén-, üveg- és kvarcszál erősítésű kompozitok, de ezen a gépen használták először a GLARE-t, ami üvegszálas kompozit laminátum és alumínium lemezek együttese). A jelenleg is tesztelés alatt álló Boeing 787 Dreamliner típusú repülőgép tömegének 50%-át, az alkatrészeknek ugyanakkor 80%-át készítették kompozit anyagokból. E repülőgép érdekessége, hogy a törzse kompozit szekciókból épül fel, minden egyes

⁵ Alumínium-lemezborítású méhsejtek vízesedése más okokra vezethető vissza. Egyik ok az lehet, hogy a kötőelemek és furataik közötti rés nem kellően szigetelt, és ezek mentén szivárog be a víz a magba. A másik ok az, hogy a panelek szélein (bondline) a rések ugyan kitöltött gyantával szigeteltek, ám a napsugárzás és a rezgés hatására ezek megrepednek, és így már képes a víz keresztülszivárogni rajtuk egészen a méhsejtig.

törzsszekció egy darabból áll, ezzel mintegy 50 000-rel kevesebb kötőelemet kell egy repülőgép összeszerelésekor felhasználni. Ez számos egyéb ok mellett legfőképp a tömegcsökkenés, valamint a kedvezőbb aerodinamikai jellemzők miatti kisebb üzemanyag-fogyasztás okán kedvező az üzemeltetők számára.

Jelenleg azonban nem teljes körűen ismert a kompozit törzs hosszú távú viselkedése, mennyire sérüléstűrő a gyakorlati üzemeltetés során, ezért is óvakodtak többen is a kompozit törzs építésétől. Ez az oka annak, hogy először a hosszú távú járatokat teljesítő repülőgépek esetében használják fő szerkezeti elemek alapanyagaként a társult anyagokat, hiszen így viszonylag kisszámú ciklusidővel, de hosszú időszakról lehet tapasztalatokat gyűjteni. Az időszakos átvizsgálásokra érkező repülőgépeken nagy számban találhatók felületi karcok, benyomódások, repedések, melyeket sokszor a földi kiszolgálás során (utaslépcsők, raklap-rakodók, stb.) okoznak. A jelenleg használt kompozit alkatrészek jelentős biztonsági tényezővel készülnek. A kompozitok, mint az látható volt, a terhelésekkel szemben az izotróp anyagoktól eltérő módon állnak ellent. Az anizotróp szerkezetű alkatrészeket nem kifáradásra méretezik, hanem jelenleg a tervezése során általában a nyomást veszik alapul az élettartamra történő méretezés során. A kutatások azonban olyan új anyagok megalkotásának irányába is folynak, melyek szilárdsági jellemzői meghaladják a jelenleg létező kompozitokét, így fő szerkezeti elemként is használhatóak.

A dolgozatban szándékosan nem esett szó a javításáról, nem szabad ugyanakkor elfeledkezni arról, hogy ez a tevékenység szorosan összefügg a terhelhetőség fenntartásával, esetleg annak növelésével. Ennek sikeres végrehajtásához elengedhetetlen a megfelelő anyagvizsgálati módszerek megléte, olyanoké, melyeket a már meglévő módszerek alapján vagy kifejezetten kompozit alkatrészek sérüléseinek elemzéséhez tökéletesítettek.

Egyelőre fejlesztési fázisban vannak az önjavító mechanizmusok, azonban némely eljárás esetében már történtek gyakorlati kísérletek. A hőre keményedő polimerek esetében önjavító eljárás történhet mikrokapszulákkal (microcapsule), üreges szál módszerrel (hollow fibre approach), termikusan reverzibilis térhálós polimerekkel (thermally reversible crosslinked polymers), termoplasztikus adalékokkal vagy láncátrendeződéssel. Némely eljárás még gyerekcipőben jár, ám vannak már közel évtizedes korú módszerek is, és a repülőiparban jelenleg az várható, hogy az üreges szál módszer terjed el szélesebb körben. Ez esetben ugyanis nem kell a beágyazó anyag szilárdságát csökkenteni, hanem célszerű az erősítőszálak belsejében elhelyezni az önjavításhoz szükséges folyadékot. A módszer akár a sérülések kimutatását is egyszerűsítheti, hiszen a szálakban tárolt folyadék külső hatás nyomán szétterjed a sérülés helyén, mely gyorsabb hibafeltárást tesz lehetővé.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bagossy – Benedek – Toma: Repülőgép-szerelő anyag- és gyártásismeret, Műszaki Könyvkiadó, 1979
- [2] Czvikovszky – Nagy – Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, 2000
- [3] Doung – Wang: Composite Repair – Theory and Design, Elsevier, 2007
- [4] Farkas Csaba: Kompozit sárkányszerkezetű repülőgép konstrukciók tervezésének, gyártásának és üzemeltetésének időszerű kérdései, Repüléstudományi Közlöny XX. évfolyam 2008. 2. szám
- [5] Hiddon – Kaddour – Soden (editors): Failure Criteria in Fiber Reinforced Polymer Composites, Elsevier, 2004
- [6] Lukács – Csomós – Gácsi - Karcagi – Magyar – Tomolya: Fáradásos repedésterjedés különböző típusú kompozitokban, Anyagvizsgálók Lapja, 2004/4
- [7] Koncz – Magyarosi – Pusztai: Kompozitok és szendvicsszerkezetek - Repülőgép kompozit szerkezetjavító szakmai oktatási jegyzet, 2000
- [8] Matzkanin – Yolken: Techniques for the Nondestructive Evaluation of Polymer Matrix Composites, The AMMTIAC Quarterly, Vol. 2, Number 4
- [9] Donald H. Middleton: Composite Materials in Aircraft Structures, 1990
- [10] Michael Chun-Yung Niu: Composite airframe structures, Conmilit Press Ltd., 1992
- [11] Michael Chun-Yung Niu: Airframe structural design, Conmilit Press Ltd., 1988
- [12] Gurit: Guide for composites
- [13] Hexcel: Honeycomb Sandwich Design Technology, 2000
- [14] R&G: Handbook – Composite Materials (Edition 8)
- [15] AIRBUS: XSC3-Airbus Composite Engineering Course, 2009
- [16] BOEING: Advanced composite repair for engineers, 1997
- [17] Composite materials handbook, U.S. Department of Defense, 1997
- [18] Aaron Charon Hot/Wet Environmental Degradation of Honeycomb Sandwich Structure Representative of F/A 18; Discolouration of Cytec FM-300 Adhesive, 2000
- [19] <http://www.muanyagesgumi.hu/archive/M352.pdf>
- [20] <http://www.muanyagesgumi.hu/archive/M903.pdf>