

A HAJTÓMŰ ALKATRÉSZ ALAPANYAGOK JELENE ÉS JÖVŐJE⁴

A repülőgépek sárkányszerkezetének fejlődését az utóbbi időben egy új szerkezeti anyag tette lehetővé, amelyet kompozit néven ismert meg a világ. A hagyományos acél, illetve „dural” építési anyagoktól kedvezőbb szilárdsági és sűrűségi jellemzői biztosították a korszerű repülőgép szerkezeti elemek gyárthatóságát. De mi a helyzet a sugárhajtóművek területén? A cikkben bemutatásra kerülnek a nemzetközi anyagtechnológiai fejlesztések azon eredményei, amelyek révén, - kompozit anyagok felhasználásával- a hajtómű-gyártásban is előrelépés következhet be.

THE PRESENT AND FUTURE OF THE STOCKS OF THE ENGINES' COMPONENTS

A new structural material, which is known composite around the world, has made it possible the development of aircraft airframes. Its strength and density features, which are more favourable than the traditional steel or „dural” building materials, guarantee the manufacturability of the structural parts of the modern aircraft. However, what is up on the speciality of the jet engines? In this article thereon results of developments of the international materials technology are shown in, which through may follow improvement in the engine manufacturing with the composite materials application.

ANYAGTECHNOLÓGIA

A hajtóműgyártásnál elengedhetetlen követelmények a pontosság és a megbízhatóság, ebből következően az alkatrészek szerkezeti anyagaiban a nagy szilárdsági értéket és a kiváló mechanikai tulajdonságokat kedvező technológiai jellemzőkkel kell ötvözni. Amikor a repülőeszközök hajtóműveit vesszük vizsgálat alá, kiindulási pontként fogadhatjuk el, hogy a hajtóművek készítésében felhasznált anyagoknak illetve a hajtómű gyártó cégeknek meg kell felelniük a repülési hatóságok által előírt szigorú követelményeknek.

A gázturbinás hajtómű esetében az a törekvés, hogy minél nagyobb fajlagos hasznos munkát, illetve termikus hatásfokot realizáljanak a szerkezetben. A fajlagos hasznos munka növekedése potenciálisan nagyobb tolóerőt, vagy tengelyteljesítményt, vagy megfordítva azonos teljesítmény szükséglet mellett kisebb geometriai méretet és tömeget jelent. Ugyanakkor a termikus hatásfok kisebb fajlagos fogyasztást (abszolút fogyasztást), gazdaságosabb üzemeltetést tesz lehetővé.

Az 50-es évek gázturbináinak turbina előtti hőmérséklete nem haladta meg az 1000–1200 K-t. A fejlesztések első lépésként a szerkezeti anyagok korszerűsítése jöhetett szóba. Megjelentek az egy irányba rendeződött kristályszerkezetű lapátok, majd az egykristály lapátok. Mindez

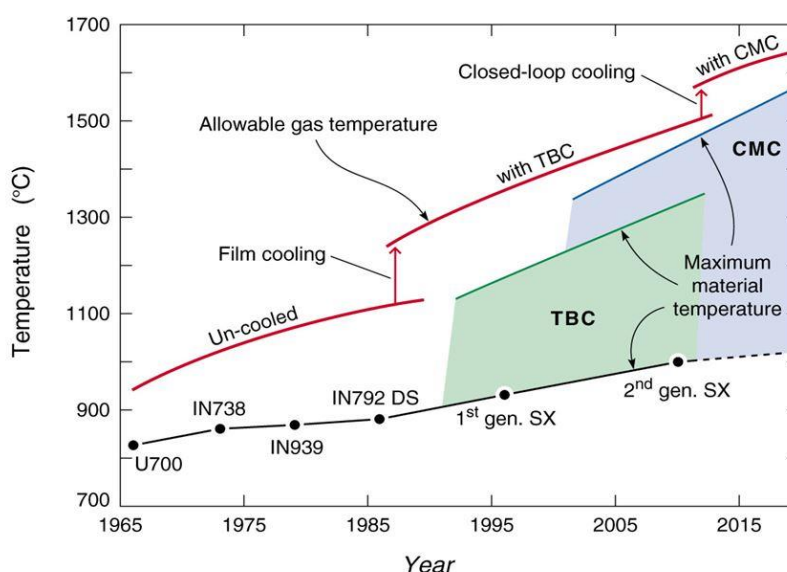
¹ alezredes, egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai repülő Tanszék, kavas.laszlo@uni-nke.hu

² közalkalmazott, főiskolai tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai repülő Tanszék, bekesi.laszlo@uni-nke.hu

³ közalkalmazott, mérnök-tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai repülő Tanszék, rozovicsne.fehér.krisztina@uni-nke.hu

⁴ Lektorálta: Dr. Varga Béla alezredes; főiskolai docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai repülő Tanszék, varga.bela@uni-nke.hu

párhuzamos volt a turbina tárcsák és lapátok egyre kifinomultabb hűtési rendszereivel. Az egykristály lapátok tulajdonságai tovább javíthatóak hővédő bevonattal (TBC – Thermal Barrier Coating). Az eljárás lényege, hogy a felületet kb. 0,2 mm, hőszigetelő kerámia réteggel vonják be, ami 100-300 K hőmérséklet különbséget képes fenntartani a forró gáz és a lapát anyaga között. Ennek a fejlődési folyamatnak köszönhetően, napjainkban a turbina előtti maximális gázhőmérséklet 1800 K körül mozog. Az egykristály szerkezeti megoldást nem csak a turbina lapátoknál alkalmazzák, hanem a tárcsa a lapátózással egyetlen fémkristályból áll, amelyet speciális háromdimenziós forgácsolási eljárással alakítanak ki. Az így kialakított turbinák esetében a maximális turbina előtti hőmérséklet meghaladhatja a 2200 K-t (F119-es hajtómű, az F-22 Raptorba, illetve az F135-ös hajtómű az F-35 Lightning II-be építve) [1].



1. ábra A turbina előtt megengedett maximális gázhőmérséklet alakulásában tapasztalható fejlődés⁵

Hagyományos hajtómű alapanyagok

Napjainkban a hajtóműgyártás meghatározó anyagai a titán és nikkel alapú ötvözetek (szuperötvözetek) - amelyek az 1950-es évektől folyamatosan fejlődtek, és alkalmazásuk területén a csúcst a századfordulón érték el - illetve a nagyszilárdságú acélok. Ezen anyagok alkotják a hajtóművek alkatrészeinek alapanyagát.

1. Titán ötvözetek

A titán sűrűsége majdnem fele az acélénak, míg szilárdságuk megközelítően azonos. Magas üzemi hőmérsékletnél, korrozív környezetben illetve olyan területen használják, ahol a szerkezeti tömeget csökkenteni kell. Magas élettartama miatt előkelő helyet foglal el a repülőgép alkatrészgyártásban, azon belül is legfőképp kompresszor alkatrészek készülnek ötvözeteiből.

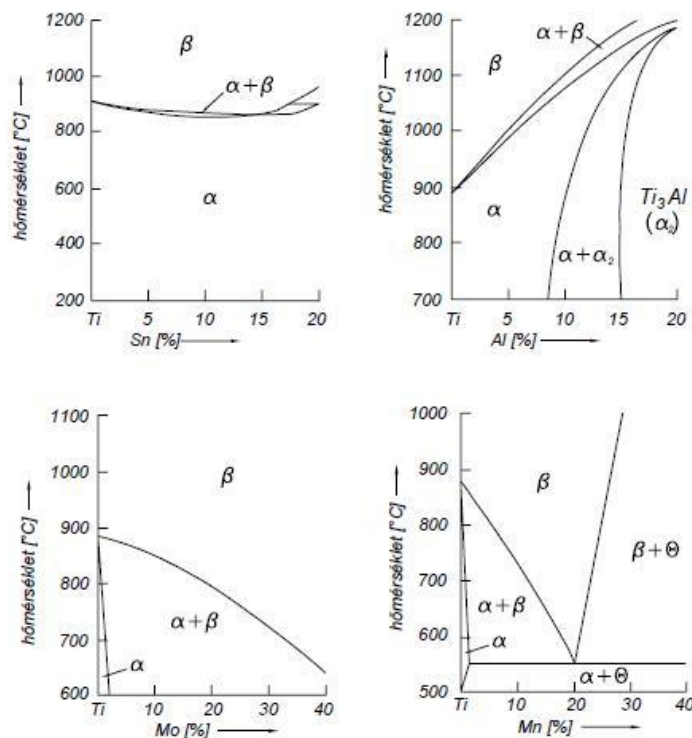
A titán ötvözőit három csoportba sorolhatjuk stabilizáló hatásuk miatt:

- α - ötvözetek, amelyek hexagonális szerkezetűek. Ebben a csoportban az ötvözők az alumínium (Al), az oxigén (O) és az ón (Sn). Ezen ötvözetek korlátozott mértékben

⁵ <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/high-temp.html>

alakíthatóak, viszont nagymértékben megakadályozzák az öregedést okozó elemek (oxigén, nitrogén, szén) diffúzióját.

- β - ötvözetek, amelyek térben középpontos szerkezetűek. Ebben a csoportban az ötvözők a vanádium (V), a króm (Cr), molibdén (Mo) és a vas (Fe). Ezen ötvözeteknek a szilárdságuk nagyobb, sűrűségük is magasabb, mint az α típusúaké. Hidegen jól alakíthatóak.
- $(\alpha+\beta)$ - ötvözetek, amelyek többfázisú anyagok. Ezen típusú ötvözetek szilárdsága nem éri a β - ötvözetek szilárdságát, és a sűrűségük is jóval alacsonyabb értékű. Mechanikai tulajdonságaik hőkezeléssel javíthatóak. Nagy szilárdságú korróziós igénybevételnek kitett alkatrészek gyártására használják [2].



2. ábra A titánötvözők hatása⁶

A leggyakrabban használt titánötvözet a 6% alumíniumot és 4% vanádiumot tartalmazó Ti6Al4V vagy más néven Ti64, amely az $(\alpha+\beta)$ - ötvözetek csoportjába tartozik. Lényegesen erősebb, mint a kereskedelmi tisztaságú titán, mindeközben ugyanazt a merevséget produkálja. Nagy szilárdsága mellett jól alakítható az alacsonyabb hőmérsékleteken. Tipikus felhasználási területeként említhető a sárkányszerkezetekben hajtóműterek borítás lemezeként, vagy nagysebességű repülőgépeknél szárny és vezérsíkok belépő él szekciójaként, illetve a hajtóművekben kompresszor alkatrészeknek és kötőelemeknek szolgál alapanyagául.

További fontos titánötvözetek a Ti6242 (Ti6Al2Sn4Zr2Mo), a Ti6246 (Ti6Al2Sn4Zr6Mo) illetve az IMI834, amely 5,8% alumíniumból, 4% ónból, 3,5% cirkóniumból, 0,7% nióbiumból, 0,5% molibdénből és 0,3% szilíciumból áll.

⁶ DR. KIRCHFELD MÁRIA: Műszaki anyagok, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2007., digitális egyetemi jegyzet

A Ti6242 és Ti6246 titánötvözeteket főként olyan területeken használják, ahol a nagy szilárdság és kis tömeg mellett szükség van a nagy korrózióállóságra is. A Ti6242 a leggyakrabban használt titánötvözet a sugárhajtóművek kompresszorának illetve utánégető szerkezetének alapanyagaként, míg a Ti6246 kompresszor tárcsák és egyéb lemez alkatrészek alapanyagaként szolgál.

Az IMI834 titánötvözet kiemelkedik a többi titánötvözet közül, mert megőrzi jó mechanikai tulajdonságait 600°C felett is. Fő felhasználási területe a hajtóművek részeként megtalálható kompresszor ház és lapát. Az előállítása bonyolult, így majdnem kétszeres ára van a Ti64-hez képest.

Anyagminőség	Szövet	R _m [N/mm ²]	R _{p0,2} [N/mm ²]	A [%]	Tulajdonságok	Felhasználás
Ti5Al2,5Sn	α	900	800	8	hidegszívós	repülőgép alkatrészek, kompresszor
Ti6Al2Sn4Zr2Mo	α	950	880	10	hőkezelhető	kompresszor lapát
Ti8Al1Mo1V		950	900	10		
Ti6Al4V	α+β	1100	1000	10	hegeszthető	hajtómű alkatrészek, tömítő egységek
Ti6Al6V2Sn		1200	1100	8		
Ti6Al2Sn4Zr6Mo	β	1300	1180	10		
Ti13V11Cr3Al	β	1350	1200	5	kovácsolható	nagyszilárdságú kötélemek

1. táblázat Szabványos titánötvözetek DIN 17851 alapján⁷

2. Nikkel alapú szuperötvözetek

A repülőgép sugárhajtóműve környezeti levegőt szív be. Sűrítés után tüzelőanyagot kever ehhez a nagynyomású gázhoz, majd meggyújtja a keveréket. Ezen keverék az elégésével megforgatja a turbinát.

„Mint minden hőerőgépnél, a gázturbinának is annál nagyobb a hatásfoka, minél nagyobb a munkaközeg legmagasabb és legalacsonyabb hőmérséklete közti különbség. Ez azt jelenti, hogy a hatásfok növeléséhez az égéstérből a munkatermelő részbe kilépő gázkeverék hőmérsékletét a lehető legmagasabbra kell emelni. Ezt a magas hőmérsékletet kell elviselniük az égőtér hátsó szelvényeinek és a turbinalapátoknak. Ez utóbbiak ráadásul még percenként akár 11000-et meghaladó fordulatszámon forognak is.”⁸

Tehát a turbinákban található álló és forgó lapátoknak olyan anyagból kell készülniük, amelyek nagyon magas hőmérsékleten megőrzik szilárdságukat és ellenállóak a korrózióval szemben. Erre használhatóak a nikkel alapú szuperötvözetek.

„A szuperötvözetek olyan fémötvözetek, amelyeket magas hőmérsékleten (akár az olvadáspontjuk 100%-ának megfelelő hőmérsékletű környezetben) használnak. A nagy szilárdság, a kúszással és az oxidációval szemben való ellenállás az elsődleges kritérium, amit ki kell elégíteniük.

⁷ DR. KIRCHFELD MÁRIA: Műszaki anyagok, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2007., digitális egyetemi jegyzet

⁸ LENDVAI JÁNOS: Szuperötvözet egykristályok-drágakövek a gázturbinákban, Fizikai Szemle 2006/10. B3.o., wwwold.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0610/lendvai0610.html

Vas, kobalt és nikkel alapú szuperötvözetekkel lehet találkozni, ez utóbbi az, amely a repülőgép hajtóművekben a legsikeresebb alkalmazott anyag.”⁹

A nikkel alapú szuperötvözeteknek a legfontosabb ötvözői az alumínium, a titán illetve újabban a króm, a molibdén, a wolfram, a tantál, a nióbbium, a vanádium és a rénum. Ezen változatos összetevők miatt többfajta nikkel alapú szuperötvözetet hoztak létre és szolgálnak alapanyagul. Például: Hastelloy nagy korrózió állóságú fémötvözetek, Inconel ausztenites nikkel-króm alapú szuperötvözetek (IN600, IN617, IN625, IN690, IN718, INX-750), Waspaloy öregedésálló ausztenites nikkel alapú szuperötvözet, Rene ötvözetek (Rene 41, Rene 80, Rene 95, Rene N5), Haynes nikkel-kobalt alapú ötvözetek, Incoloy szuperötvözetek, MP98T nikkel-kobalt alapú ötvözet és a CMSX egykristály ötvözetek (CMSX-2, CMSX-3, CMSX-10, CMSX-486).



3. ábra RB199 sugárhajtómű turbina lapátja¹⁰

3. Nagyszilárdságú acélok

A nagyszilárdságú acélok az erősen ötvözött acélok csoportjába tartoznak. Mint a fent bemutatott ötvözeteknél, ennél a csoportnál is több fajta létezik attól függően, hogy milyen anyaggal ötvözik az acélt. Ezen alapanyagokat főként a hajtóművek turbinalapátjainak és csapágyainak anyagaként használják fel.

A korrózióálló nagyszilárdságú acélok fő ötvözői a króm illetve a nikkel. Az ebbe a csoportba tartozó acélokra, mint például 17-4PH, 17-7PH, 301-ANN, 321-ANN etc. a korrózióállóság mellett a jó alakíthatóság, a nagy szilárdság és keménység a jellemző.

A 41xx (4130, 4140) jelű nagyszilárdságú acélok jellemző ötvözői a króm, a molibdén és a mangán, amik a következő tulajdonságokkal ruházzák fel ezen acélokat: kiváló szilárdság-tömeg arány, lényegesen nehezebbek és erősebbek a hagyományos acéloknál. Hegesztésük nehézkes, ezért hegesztés előtt és után hőkezelik az anyagot.

Korszerű hajtómű alapanyagok

A korszerű hajtómű alapanyagok használata két nagy előnnyel jár: a belőlük készült hajtóműveknek kisebb a fajlagos tüzelőanyag fogyasztásuk, mert magasabb hőmérsékleten mehet végbe

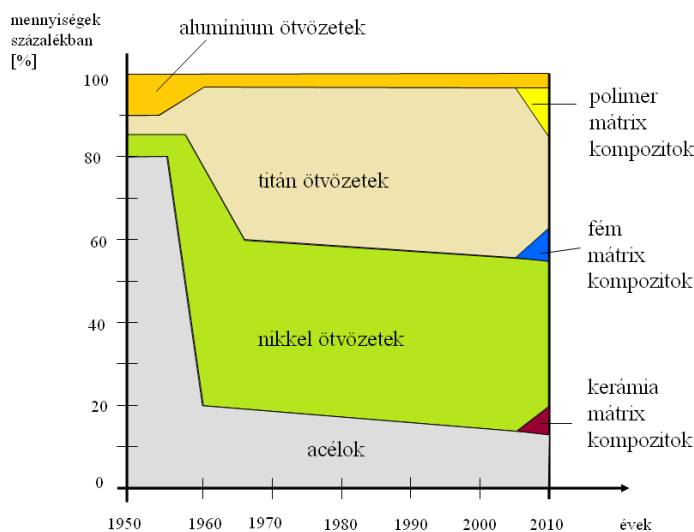
⁹ DR. RÉTI TAMÁS, DR. ZSOLDOS IBOLYA: Válogatott fejezetek az anyagtudományból, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2011., digitális egyetemi jegyzet

¹⁰ RB199 sugárhajtómű turbina lapátja, forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Turbineschaufel_RB199.jpg

az égés az égéstérben („tökéletesebb” lesz az égés, tehát kevesebb üzemanyag szükségeltetik) illetve szerkezetük könnyebb lesz, így olcsóbbá válik az üzemeltetés és alacsonyabb szintű lesz a károsanyag-kibocsátás.

Két fontos csoport emelhető ki a korszerű hajtómű alapanyagok közül: a szálerősítésű kompozitok, amelyek polimer, fém vagy kerámia mátrixúak és a monolitikus intermetallikus anyagok. A kompozitok magas hőmérsékleten tanúsított viselkedése nagymértékben függ az alkalmazott mátrix anyagától.

A szálerősítésű kompozitok, ahogy a 4. ábrán is látható, nem csak megjelentek a XXI. században, hanem egyre nagyobb részben használatosak alapanyagként a hajtóműgyártásban.



4. ábra Alapanyagok felhasználása a hajtóműgyártás alkatrészeiben 1950-es évektől napjainkig

4. Polimer mátrix kompozitok (PMC-Polymer Matrix Composites)

Az 1940-es évek elején felmerült az igény olyan anyag iránt a katonai repülőgépgyártásban, amellyel nehezebben lehet a repülőgépeket radarral felderíteni, vagyis csökkent radarhullám visszaverő képességekkel rendelkezik. Innentől kezdve datálható a polimer mátrix kompozitok megjelenése a repülés területén belül. Nem csak „radarállósága” miatt lett népszerű ez az anyagcsoport a repülésben, hanem gazdasági okokból is, hiszen az alkatrészek tömegének csökkenésével az előállítási költségük szintén csökken. Termikus stabilitás javítására és szilárdságnövelésre használják, ugyanakkor korrózióálló, alaktartó, hosszú élettartamú, ellenáll az időjárás viszontagságainak.

A polimer mátrixú anyagok legalább két alkotórészből állnak. Az egyik a hordozóanyag - más néven mátrix -, a másik pedig az erősítőanyag, amelyet körülölel a hordozóanyag. Két nagy részre oszthatóak a polimer mátrixú kompozitok: hőre lágyuló és hőre keményedő fajtákra. A polimer mátrix alapanyaga lehet poliészter, epoxigyanta, vinilészter, míg az erősítőanyagnál leggyakrabban használt alapanyagok az üveg, a szén, az aramid és a polietilén.

Az üvegszál erősítésű epoxigyanta mátrixú kompozitokat főként olyan helyeken használják, ahol nincs kitéve ez az anyag nagyon magas hőmérsékletnek, mint például a hajtómű ventilátorának burkolata, szárnyborítás, tömítések és távtartó. Ezen alkatrészek megtalálhatóak a CF6-80, CFM 56 illetve a GE 90 típusú hajtóművekben.

A jövőben a PMC alapanyagú elemek száma növekedni fog a hajtóművekben jó tulajdonságai és gazdaságossága miatt.

5. Fém mátrix kompozitok (MMC-Metal Matrix Composites)

A fém mátrix kompozitok előállításánál hordozóanyagként bármilyen fém szóba jöhet, de legelterjedtebben a könnyűfémeket, mint például a magnéziumot, az alumíniumot, a titánt használják valamint a szuperötvözeteket is, erősítőanyagként pedig fém-, bór-, szén-, grafit-szálakat illetve különböző anyagú kerámiákat helyeznek a mátrixba. Jó szívósságot és magasabb működési hőmérsékletet biztosítanak ezen kompozitok, de mégsem annyira elterjedtek, mint a polimer mátrixú kompozitok, valószínű az előállítási technológiájuk bonyolultsága és ez által drágasága miatt.

Az egyik legígéretesebb a titán mátrixú kompozit. Körülbelül 50%-os a súlycsökkenés a hagyományos titán ötvözetekhez képest mindez nagy merevség és szilárdság mellett. Ehhez a kompozithoz főként szilícium-karbid (SiC) szálakat adnak erősítésként, amelyeket karbon réteggel vonnak be, hogy elkerüljék a mátrix és az erősítőanyag reakcióba lépését a gyártás során. Kompresszor forgólapát koszorúkat (5. ábra) állítanak elő ebből az anyagból továbbá tengelyeket, valamint ventilátor lapátokat is.



5. ábra Kisnyomású kompresszor fokozat forgólapát koszorúja¹¹

Nem csak szilícium-karbid, hanem a bór szálak is megjelennek erősítőanyagként alumínium és titán mátrixú kompozitokban, attól függően, hogy mely hajtómű alkatrész készül belőle; titán-bór társításban sugárhajtómű ventilátor forgórészénél használatos, míg az alumínium-bór társítást kompresszor forgórész alapanyagaként használják.

6. Kerámia mátrix kompozitok (CMC-Ceramics Matrix Composites)

A kerámia mátrix kompozitok ígéretesnek bizonyulnak a hajtóműgyártásban az alábbi tulajdonságaik miatt: nagy merevség, magas hőmérsékleten jó szilárdság, termikus stabilitás, oxidatív környezetben korrózióval szembeni jó ellenálló képesség, alacsony sűrűség.

Eltérést mutat a fém és a polimer mátrix kompozitokhoz képest, hogy a mátrix nagyon rideg,

¹¹ BERNDT R. MÜLLER, AXEL LANGE, MICHAEL HARWARDT, MANFRED P. HENTSCHEL, BERNHARD ILLERHAUS, JÜRGEN GOEBBELS: First Refraction Enhanced 3D Computed Tomography – Application to Metal Matrix Composites, <http://www.ndt.net/article/ct2003/v02/v02.htm>

és ha külső hatás miatt repedés keletkezik, akkor az először a mátrixban jelentkezik, nem pedig a szálakban, mint a másik két fajtájú kompozitnál.

A CMC-k erősítőanyagaként szilícium-karbid, karbon és alumínium-oxid szálakat használnak, míg a befogadó anyagnál szintén megtalálható a szilícium-karbid, alumínium-oxid illetve e két anyag keveréke. Természetesen más anyagokat is használnak mátrixként, mint például cink-oxid vagy üveg.

Kétféle szálanyag kerülhet szóba a hajtóműgyártásnál: az oxid illetve a nem oxid szálak. A nem oxid szálak fő képviselője a szilícium-karbid (SiC), amely megfelelő kúszási jellemzőkkel rendelkezik, de kémiai reakció jöhet létre a szálanyag és mátrix között, ha nincs megfelelő bevonat a szálakon. A 2. táblázat mutatja be, hogy mennyit javít bizonyos anyagok műszaki paraméterein, ha szilícium-karbid szálakkal lettek megerősítve. Az oxid szálaknál az alumínium-oxid (Al_2O_3) emelkedik ki, amely termikusan stabil, viszont kúszási mutatói nem a legmegfelelőbbek.

Anyagok	Szakítószilárdság [MPa]	Törési szívósság [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]
Al_2O_3	550	5,5
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$	790	8,8
SiC	495	4,4
SiC/SiC	756	25,3
ZrO_2	206	5,5
ZrO_2/SiC	446	22
Si_3N_4	467	4,4
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$	790	56,1
üveg	62	1,1
üveg/SiC	825	18,7
üvegkerámia	206	8,2
üvegkerámia/SiC	825	17,6

2. táblázat Szilícium-karbid erősítésű szálak hatása kerámia anyagok műszaki tulajdonságaira¹²

Tulajdonságai miatt a kerámia mátrix kompozitokat a hajtóműveknél inkább az alacsony nyomású részeknél használják, mint például diffúzor rész kúpja vagy terelő lapátok. A General Electric és Rolls Royce együttműködése folytán jött létre az F136 gázturbinás hajtómű, amelynek állórész lapátjainál illetve a Snecma M88 hajtóműnek a gázsebesség fokozó redőny elemeinél jelenik meg alapanyagként.

¹² KONCZOS GÉZA: Korszerű anyagok és technológiák (előadás III. éves BME mérnök-fizikus hallgatók részére, 9. fejezet Kompozit anyagok, <http://www.szfi.hu/~koczso/tanfolyam/>



6. ábra F136 hajtómű¹³



7. ábra Snecma M88 hajtómű¹⁴

7. Intermetallikus vegyületek

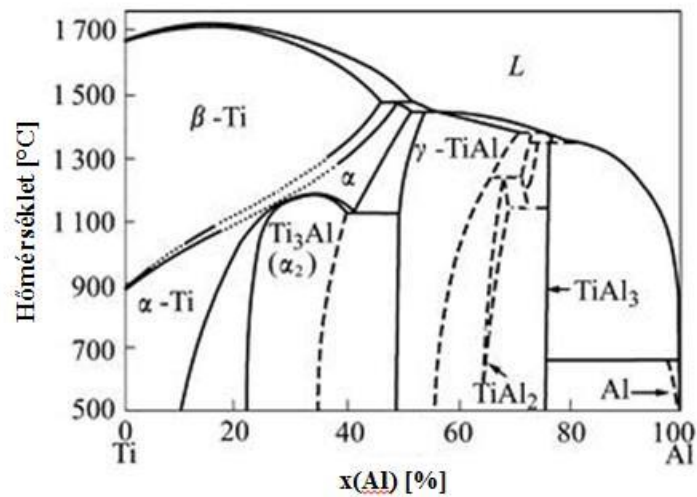
Az intermetallikus (fémközi) vegyületek általában kétkomponensű ötvözetek megszilárdulásából alakulnak ki [3]. Ezen vegyületek közül a titán és alumínium alkotta intermetallikus vegyület emelkedik ki a repülőgép alkatrész gyártás területén.

Három fő fémközi vegyülete ismert: γ -TiAl, α_2 -Ti₃Al és Ti-Al₃ (8. ábra). Általános jellemzőjük, hogy a belőlük készült alkatrészeknek kicsi a tömegük, jó az ellenálló képességük a korrózióval és a hővel szemben, viszont elég rideg anyagok, különösen alacsony hőmérsékleten. Hajlékonyságuk növelhető kémiai összetevők módosításával illetve a gyártási paraméterek optimalizálásával. Kb. 40 évvel ezelőtt kezdték ezen anyagok fejlesztését az autó- és a repülőgépgyártásban [4].

A három vegyület közül a γ -TiAl-t használják a legelterjedtebben. Kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, amelyekből kiemelkedik a magas hőmérsékleten tapasztalható korrózióállósága (600 °C felett). Nagy lehetőség mutatkozik a hajtómű tolóerő-tömeg arány javítására ezen a vegyületek mind szélesebb körű alkalmazásával. Az alacsony nyomású turbina lapátok és nagy nyomású kompresszor lapátok alapanyagaként, már kezdi átvenni a nikkel-ötvözetek helyét [5].

¹³ F136 hajtómű, forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Sdd_f136_006.jpg

¹⁴ Snecma M88 hajtómű, forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/File:M88-2_Engine.JPG



8. ábra Ti-Al fázis diagramja¹⁵

A General Electric a GENx hajtóművében az alacsony nyomású turbina lapátok alapanyaga a γ -TiAl vegyületet, amelyeket a Boeing B 787 illetve a B 747-8-as repülőgépekben használnak.



9. ábra GENx hajtómű a Boeing 747-8I prototípusában¹⁶

¹⁵ L. HUANG: Microstructural Control of Ti-Al-Nb-W-B Alloys, <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-007-9113-x/fulltext.html>

¹⁶ Olivier Cleynen: GENx hajtómű a Boeing 747-8I prototípusában, forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/File:General_Electric_GENx_on_747-8I_prototype.jpg

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KOLLÁTH SZ.: Gázturbinás hajtóművek evolúciós fejlődése, szakdolg. (konz. Varga B.), p 64
- [2] DR. KIRCHFELD MÁRIA: Műszaki anyagok, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2007., digitális egyetemi jegyzet, 83. o.
- [3] KONCZOS GÉZA: Bevezetés az anyagtudományba (III. éves vegyészmérnök hallgatók részére), Fémek és ötvözetek, <http://www.szfki.hu/~konczos/tanfolyam/>
- [4] Reade - Your higher technology speciality chemicals resource, <http://www.reade.com/products/5-aluminide-compounds-feal-nial-tial-mgal-powder/776-titanium-aluminide-powder-tial-ti3al-tial3-ti-48al-2nb-2cr-ti2-alnb-titanium-aluminide-powder-titanium-aluminide-sheet-tial-ti3al-tial3-ti-48al-2nb-2cr-ti2alnb-titanium-aluminide-powder-tial-ti3al-titanium-aluminide-sheet-> (2014.02.27.)
- [5] Reade - Your higher technology speciality chemicals resource, <http://www.reade.com/products/5-aluminide-compounds-feal-nial-tial-mgal-powder/776-titanium-aluminide-powder-tial-ti3al-tial3-ti-48al-2nb-2cr-ti2-alnb-titanium-aluminide-powder-titanium-aluminide-sheet-tial-ti3al-tial3-ti-48al-2nb-2cr-ti2alnb-titanium-aluminide-powder-tial-ti3al-titanium-aluminide-sheet> (2014.02.27.)