

# GAZ TÜRBİNLİ UÇAK MOTORLARINDA TİTANYUM ALAŞIMLARININ KULLANIMI

**Mümtaz Salih ERDEM**

Dr. TET-CHSAŞ Motor San. A.Ş.

**Koray AYDIN**

Hük. Mak. Müh. TET-CHSAŞ Motor San. A.Ş.

## ÖZET

Bu makalede uçak motorlarında kullanılan titanyum alaşımlarına genel bir bakış yapılmış ve bu malzemelerin gelecekteki kullanımları tartışılmıştır. Uçak motorlarında kullanılan titanyumun bazı özellikleri gözler önüne serilmiştir. Uçak motorlarının maruz olduğu sıcaklık ve gerilme değerleri, kalite açısından çok yüksek dayanımlı ve emniyetli malzemelerin belirlenerek kullanılmasını gerektirmektedir. Burada çevre açısından en önemli unsur olan çevre kirliliği kavramına önemle işaret etmek gerekir. Bu konulardaki rekabet, üretim yöntemlerindeki maliyet unsuru ve ürünün çevrim ömrü üzerinde iyileştirmeler için baskı unsuru oluşturmaktadır. Gelecekteki eğilimler iki kısma ayrılabilir. Birincisi, geliştirilmiş özellikleri ile yeni malzemelerin kullanımı, diğeri ise üretim proseslerinde maliyet azaltıcı faaliyetlerdir. Yeni malzemeler için, bu malzemelerin ekolojik denge üzerindeki etkileri de gözardı edilmemelidir. Makalede titanyumun tercih edilme nedenleri üzerinde durulduktan sonra, mevcut ve yeni imalat yöntemleri üzerinde açıklamalarda bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Titanyum, uçak motoru, Ti-6242, Ti-62, Ti-64, IMI-834.

## ABSTRACT

The article is intended to give an overview on the necessity and future trends of titanium parts in aero-engine applications. It will shown some speciality of titanium on the aero-engines. It is well known that for aero-engines the combination of very high loading by temperature and stress together with extremely high safety levels are determining the choice of materials and the requirements for their quality. Whereas the growing consciousness concerning environmental pollution implies the same challenges just stated, the constant competition in the aero-engine industry results in an increasing pressure on manufacturing and life-cycle costs. The future trends may be divided into two categories, namely the development and introduction of new materials with improved properties and the cost reduction activities for the manufacturing process. For the new materials, their ecological niches will be shown, mainly determined by the material properties. In this article, after the necessity of titanium is discussed, current and new manufacturing methods are explained.

**Keywords:** Titanium, aero-engine, Ti-6242, Ti-62,

## Giriş

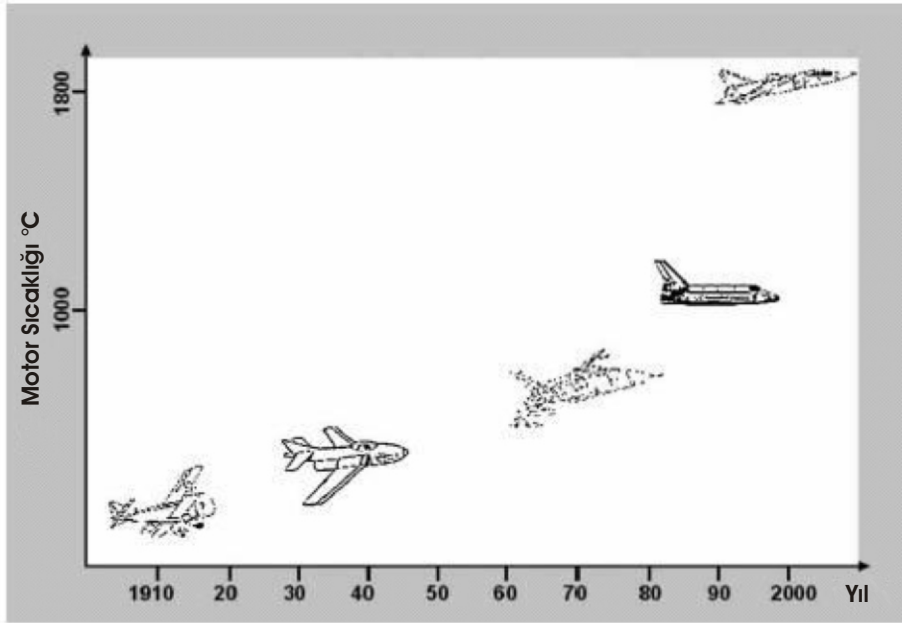
**Y**üksek güvenlik nedenleri ile birlikte sıcaklık ve yüksek gerilmelere maruz uçak motorları, malzemenin kalite gereklilikleri ve seçimini kritik hale gerektirmektedir.

Titanyum dünyada demir, alüminyum ve magnezyumdan sonra en fazla kullanılan bir metal olmasına rağmen, oldukça pahalı ve yakın zamana kadar da çok az tanınan bir metaldir. Doğada rutil (TiO<sub>2</sub>) veya ilmenit (FeTiO<sub>3</sub>) şeklinde bulunur. Oksijene karşı aşırı ilgisi dolayısıyla, titanyumu saflaştırma ve kullanılmaya hazır duruma getirme maliyeti oldukça yüksektir [1].

Son elli yılda uçak motorlarındaki titanyum alaşımların gösterdiği başarının ana nedenleri, korozyon dayanımı, kaynak edilebilirlik özelliğinin önemi ile birlikte özgül ağırlık/mukavemet (özgül dayanım) oranı değerleridir.

Bunu günümüzde geniş kullanım alanları bulan titanyumdan imal edilen değişik tip parça örnekleri ile açıklamak mümkündür. Gelecekte eğilimler, gelişmiş özellikli yeni malzemelerin kullanım çalışmaları (MMC=Metel Matrisli Kompozit v.b.) ve ham malzemenin ürünün son haline kadar olan üretim proseslerinde maliyet azaltma önlemleri olarak iki bölüme ayrılabilir. Yeni malzemelerin çok önemli özellikleri ise firmaların katkıları ile açıklanacaktır. Maliyet azaltma konusunda ve/veya en iyi karla çalışmak için ise parametreler ile birlikte üretim prosesleri kademelerindeki iyileştirmeler, önem arz edecektir [6]. Birçok jet motorunda, titanyum esaslı alaşımlar net ağırlığın %20 ila %30'unu oluşturur. Titanyum, 593°C (1100 °F)'ye kadarki operasyon sıcaklıklarında en yaygın kullanılan malzemedir [10].

1910'dan 1980'lere kadar motor sıcaklıklarında sabit bir



Şekil 1. Uçak Motorlarındaki Çalışma Sıcaklığı Artışının Yıllara Göre Değişimi [4].

artış olmasına rağmen, teknolojiye hızlı gelişmeler nedeni ile 1990'larda iki kat bir artış söz konusudur (Şekil 1). Her bir sıcaklık artışı ile motor verimliliği artar ve yakıt sarfiyatı düşer. Her bir kilogram ağırlık azalması, motorun ömrü boyunca yaklaşık 150,000\$'lık yakıt tasarrufu sağlar.

Titanyum alaşımların yüksek sıcaklık özellikleri, uçak motoru sıcak bölgelerindeki nikel esaslı alaşımlarla rekabet edebilir kılmaktadır [4].

## UÇAK MOTORLARINDA MALZEME SEÇİMİNDE ESAS KAVRAMLAR

Gelişmiş uçak motorlarında nikel alaşımlar (süperalaşım) %40 ve %20 çelik alaşımı ile birlikte yaklaşık %30 oranında da titanyum alaşımları bulunmaktadır.

Motor parçası üretilirken, hava yolları ve imalatçıların talepleri nelerdir? Bu sorunun cevabı bizim bir otomobilden beklentilerimiz ile benzerlik gösterir. Örneğin, alırken ve kullanırken maksimum fayda ile minimum maliyet ve almaya karar verdikten sonra otomobile mümkün olduğunca çabuk sahip olmanın yanında çok önemli bir kriter de güvenlidir. Bu üç kriter, günümüz ve gelecekte titanyum alaşımların seçimini anlamak için önemli olacaktır.

## UÇAK MOTORLARINDA TİTANYUM ALAŞIMLARA OLAN İHTİYAÇ

Yukarıda belirtilen gereksinimler nedeni ile fonksiyonel her alt birimde titanyum kullanmak olasılığı ve gerekliliği açık olarak görülmektedir. Güvenlik veya güvenilirlik gereksinimi, seçimde önde tutulması gereken ölçüttür.

### Güvenlik

Şekil 2, motor hataları ile birlikte geçmişte ve gelecekteki hava trafik yüküne bağlı olarak değişimi gösterir. Öncelikle, kalkış başına özel nedenlerle oluşan hataların frekansı son on yılda önemli ölçüde azalma eğilimindedir. Gerçekte, herhangi bir A noktasından B'ye uçak ile seyahat, karayolundan 100 kat daha güvenlidir [6]. Aynı zamanda hava trafiğindedeki sabit bir artış söz konusudur. Bu da motorun güvenlik seviyesinin sürekli geliştirilmek zorunda olduğunu gösterir.

Günümüzde birçok durumda önemli zaman gerektiren muayene ve testlerin yerine analitik benzetim (simülasyon=sonlu elemanlar analizi) kullanım süreci daha verimli ve ideal sonuçlar vermektedir. Bu da analitik benzetim bilgisinin önemini ve kullanımını gündeme getirir. Güvenlik seviyesinin diğer önemli etkisi, malzemenin hasar toleransı ve tasarımında karşılaşılar. Güvenliği etkileyen



Şekil 2. Hava Trafikinin Gelişimi ve Geçmişteki İlgili Motor Arızaları [6].

önemli kavramlar, kalite, muayene ve testlerin doğruluğunun temini ile birlikte üretim prosesinin değişkenliğini enküçükleme ve hatta önlemektir.

### Ömür -Çevrim Maliyetleri

Müşterilerin motordan beklentileri;

- Yüksek manevra kabiliyetine sahip olma ve yüksek ağırlıklı (daha çok yolcu kapasiteli) veya dört yerine iki motorlu uçaklara güç vermek üzere yüksek itişli,
- İstenmeyen kaydırmalı ağırlık merkezi etkilerinden (askeri uygulamalarda, motorun ağırlığı tüm uçağın %15'i kadardır) sakınmak ve yakıt tüketimini azaltmak için düşük ağırlıklı,
- Yine yakıt sarfiyatını azaltmak için yüksek verimli,
- Yasal ve havaalanı gerekliliklerini yerine getirmek için düşük gürültü ve emisyonlar, (örneğin, havayolu başına kalkış sayısı, tüm havayollarının uçaklarının gürültü ve emisyon toplamının maksimum değeri ile sınırlıdır).
- Parçanın uçuş saati ile sınırlandırılan parça-ömür maliyetleri. (Örneğin, parçaların uzun ömür ve kolay değiştirilebilirliği).

Yukarıdaki parametreler çok az sayıda bilinen temel malzeme ve proses özelliklerini işaret eder. Bu istekleri karşılayabilmek için mümkün olan malzemeye olan talep;

- Düşük ağırlıklı parçalar ve uzun ömür için özgül ağırlık, mukavemet oranı, (özgül dayanım)
- Uzun ömür ve yüksek motor sıcaklıklarına ulaşmak için yüksek sıcaklık dayanımının temini ile doğru orantılıdır..

Tasarım mühendisi için diğer kriterler; örneğin fiziksel özellikler, onaylı üretim prosesleri ve kalite prosedürlerinin yerine getirilebilirliği, kullanılan alışımları ve prosesleri kısıtlamaktadır.

### Motor Fiyatı ve Zamanında Teslim

Belirli özellikleri mükemmel bir şekilde yerine getiren güvenli bir motor, eğer fiyatı çok yüksek veya teslim tarihi çok geç ise kesinlikle ulaştırılabilir değildir. 11 Eylül nedeniyle daralan pazarın yanı sıra motor parçalarının artık düşük maliyetli üreticiler tarafından imal edilebilmesi rekabeti büyük boyutlarda arttırmıştır. Bundan dolayı olası maliyetler düşme eğilimine girmiş ve üretim zamanları kısalmıştır.

Kaliteyi iyileştirmek için en etkili yol, malzeme davranışları ve prosesler için analitik benzetim programlarının (SEA-FEM Sonlu Elemanlar Analizi-ANSYS-ABAQUS v.b.) kullanılması ile olur. Prosesi değişmez kılmak için, malzemeler, tedarikçiler ve üretim proseslerinin seçimi tasarım mühendisinin temel sorumluluğudur. Sonuç olarak, fonksiyonel ihtiyaçları yerine getiren en ucuz malzemenin seçimi, tasarım mühendisinin temel görevidir.

### Müşteri İhtiyaçlarını Karşılama İçin Parametreler ve Malzemeler

Tablo 1, önceki bölümlerin özetini verir. Bu tablo, hem

kompresör (günümüzde titanyum alaşımların baskın olduğu) hem de türbinler için geçerlidir. Ancak türbinde titanyum kullanılamaz. Çalışma sıcaklığının en çok 593°C olduğu daha önce belirtilmişti. Tablo kısaca malzemelerden beklentilere göre proses parametrelerinin durumlarını açıklar. Hangi malzemenin, hangi özellikleri proses parametrelerine etkin olmaktadır? Buna cevap veren genel bir danışma, öğrenme tablosudur.

Motorlarda ve hatta uçakta kullanılan bazı malzemelerin sıcaklık dayanımı ve yoğunluk karşılaştırmaları ise Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2'den görüldüğü üzere nikel esaslı süperalaşımları düşük yoğunluk yüksek mukavemetli uygun titanyum alaşımları ile değiştirildiğinde jet motorlarının ağırlığı ciddi anlamda düşürülebilir. Böylece itme artarken, yakıt tüketimi de düşer [8].

## GÜNÜMÜZ MOTORLARINDA KULLANILAN TİTANYUM ALAŞIMLAR VE GELECEKTEKİ İHTİYAÇ

Bu bölüme kadar malzemenin seçim kriterlerini etkileyen bir dizi kavram ve motordan beklentilere uygun malzemenin kullanımı ile ilgili genel çerçevede bilgiler sunulmuştur. Bu bölümde uçak motorunda kullanılan titanyum alaşımlarından söz edilecektir. Ek bilgi olarak seçilen alaşımların avantajları ekolojik-denge etkileri ile sınırlandırılmıştır.

Gelecekteki ihtiyaçlar ve oluşumlar için bilim adamları ve mühendisler yaratıcı bir takım faaliyetler içerisinde. Bu, prosesleri geliştirmek ve Ti malzemenin gerektirdiği özellikleri arttırmak için yapılmaktadır. Tüm bu bilgiler şekil 3 ve 5'de belirtilmiştir. Anlaşılabilir iki grupta incelemek ve bu kriterleri sıcaklık kapasitesi ve malzemenin maliyeti başlıklar altında değerlendirmek doğru yöntem olacaktır. Belirgin

**Tablo 1.** Müşteri Talepleri ile İlgili Malzemeler ve Proses Parametrelerinin İlişkisi [6].

	Güvenlik	Fonksiyonellik ve ömür çevrim maliyeti	Motorun fiyatı ve zamanında teslim
<i>Malzeme parametreleri</i>			
Fiziksel özellikler			
Spesifik mukavemet (özgül dayanım)			
Sıcaklık dayanımı			
Dizayn için serbestlik derecesi			
Hasar toleransı			
Malzeme datasının kalitesi ve analitik simülasyonun mevcut olması			
Malzeme maliyetleri			
<i>Proses parametreleri</i>			
Prosesin değişmez olması			
Kademelerin sayısı ve süresi			
Proses simülasyonun mümkün olması			
Kalite testinin doğruluğu			

Çok etkili  
Etkili

**Tablo 2.** Uçakta Kullanılan Malzemelerin Sıcaklık/Yoğunluk Karşılaştırmaları [11].

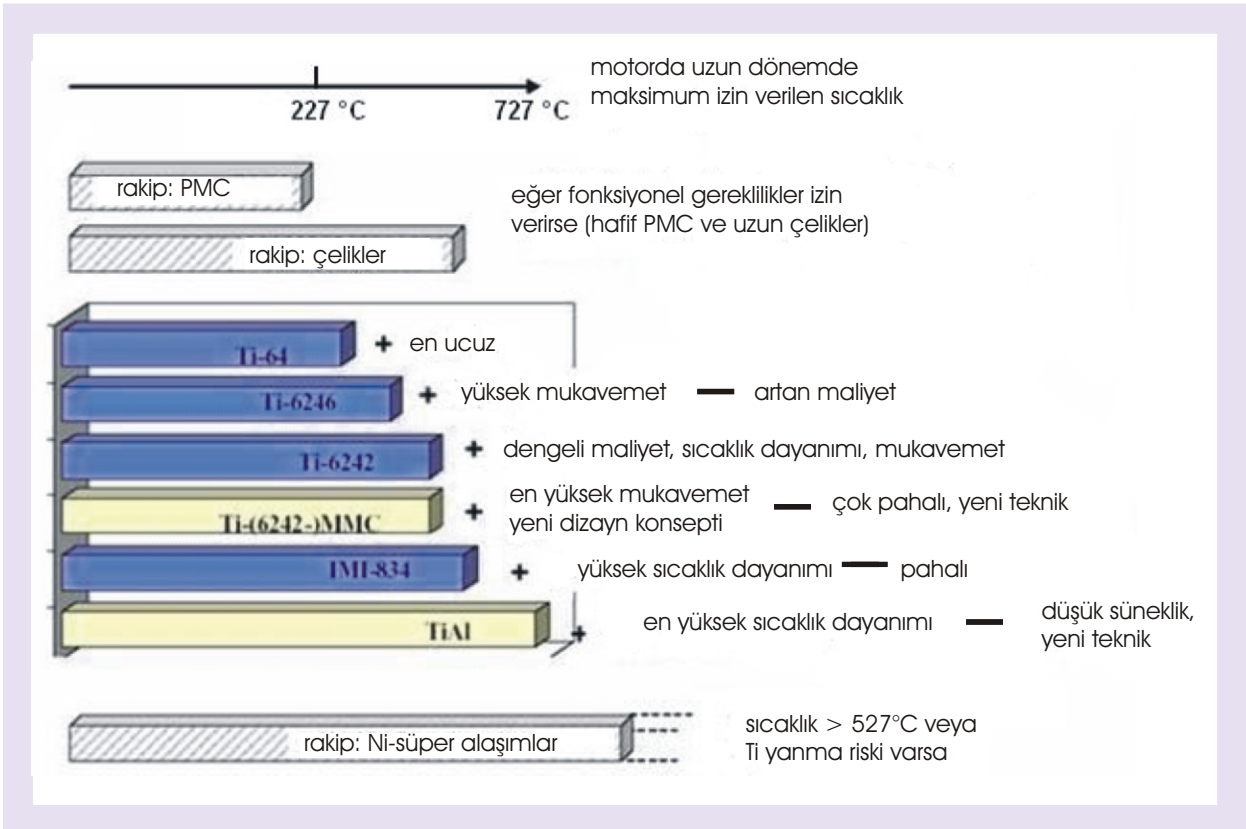
Malzeme	Sıcaklık °C	Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>
Alüminyum	227	2726
Titanyum	593	4693
Paslanmaz Çelik	838	7633
Nikel Alaşımı	1115	8252
Nikel Kristal	1393	8252
Seramik	1393	2630

isimli alaşımlar tüm kardeş alaşımları bir sınıf içinde temsil edecek şekilde incelenmiştir. Örnek olarak, Ti-17 alaşımı Ti-6246 sınıfı ile kapsamıştır.

Şekil 3'de artan sıcaklık kapasitelerine göre dayanımları (genel olarak yine maliyetlere odaklanır.) verilmiştir. Şekilin sağ tarafında (basitleştirilmiş) ana avantaj ve dezavantajlar, seçilen alaşıma göre belirlenmiştir. Ayrıca, titanyumun sınırları verilmektedir. Örneğin, rekabet edilebilir malzeme sınıfları ve titanyumdan diğerlerine geçişin koşulları gibi.

Ti-6Al-4V (Ti-64) düşük maliyetli ve uzun deneyimlerle kanıtlanmış titanyum alaşımıdır ve en yaygın kullanım alanına sahiptir. [6]. Motor ve uçak iskeleti uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti-64; düşük sıcaklıkta yüksek mukavemet, mükemmel mekanik işlenebilirlik ve kaynak edilebilir özelliklerini taşımaktadır. Ti-64 dövme, hassas döküm, levha metal (sac) olarak 1975'den beri stator parçalarında ve kompresör dış cidarlarında kullanılmaktadır [5]. Daha yüksek sıcaklıklarda Ti-6242

standart malzemedir ve ikinci yaygın kullanımı olanıdır [6]. Ti-6242 ve Ti-6246 daha yüksek mukavemet ve daha yüksek sıcaklığa dayanma özelliklerine sahiptir. 550°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, özellikle disklerde kullanılmak üzere geliştirilmiş Ti alaşımı IMI-834'tür. IMI-834 450°C'nin üzerinde, diğer titanyum alaşımlarından daha iyi özellikler gösterir [5]. IMI-834 alaşımı yüksek sıcaklık altında oldukça iyi mekanik davranışlar gösterirken, alaşımın mikroyapı değişimi de uzun zaman özelliğini korumaktadır [8]. Titanyum alaşımların kabiliyetleri IMI-834 ile 630°C'a kadar ulaşmıştır (Şekil 4) [9]. Ancak fiyatı Ti-64'ün iki katıdır. Kompleks metalurji ve ısıl-mekanik (termomekanik) işlem parametreleri ile optimum mekanik özellikler temin edilmiş, bu oransal iyileşme mikro yapıya da yansımıştır. Ti ve Ni esaslı alaşımlar (süperalaşımlar) geçen 10 yılda kendilerinden beklenen özellikleri mükemmel bir şekilde yerine getirmişlerdir. Ancak bu malzemelerin gelecekteki gelişmeleri oldukça sınırlı görülmektedir. Geliştirilmeleri yüksek miktarda ek maliyeti gerektirmektedir [5].



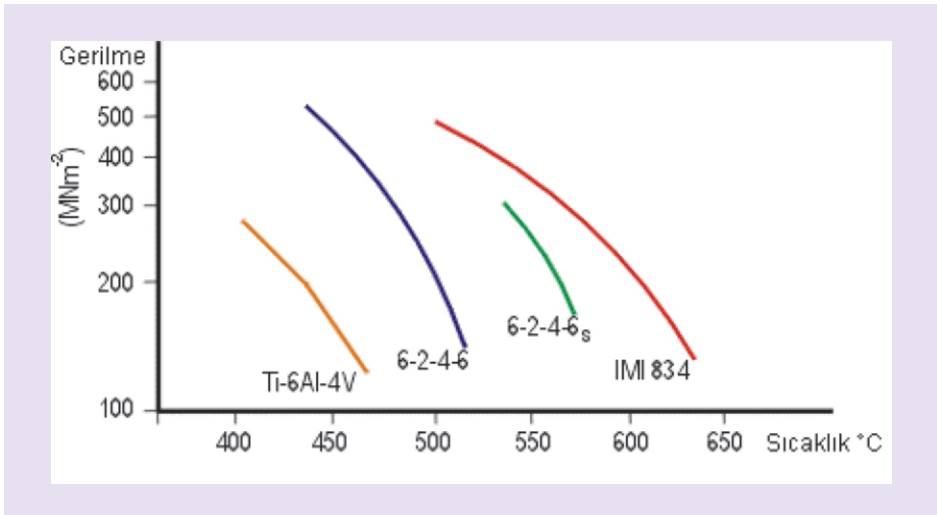
Şekil 3. Motorun Ana Malzemelerinin Avantajları ve Dezavantajları [6].

Şekil 5 motordan beklentilere bağlı olarak Ti-alaşımı cinslerinin kullanım oranlarını gösterir. Bu alaşımların motorda kullandıkları bölgeler ve günümüz potansiyel alaşımların ötesinde gelecekteki ihtiyaçlar ile birlikte verilmiştir [6].

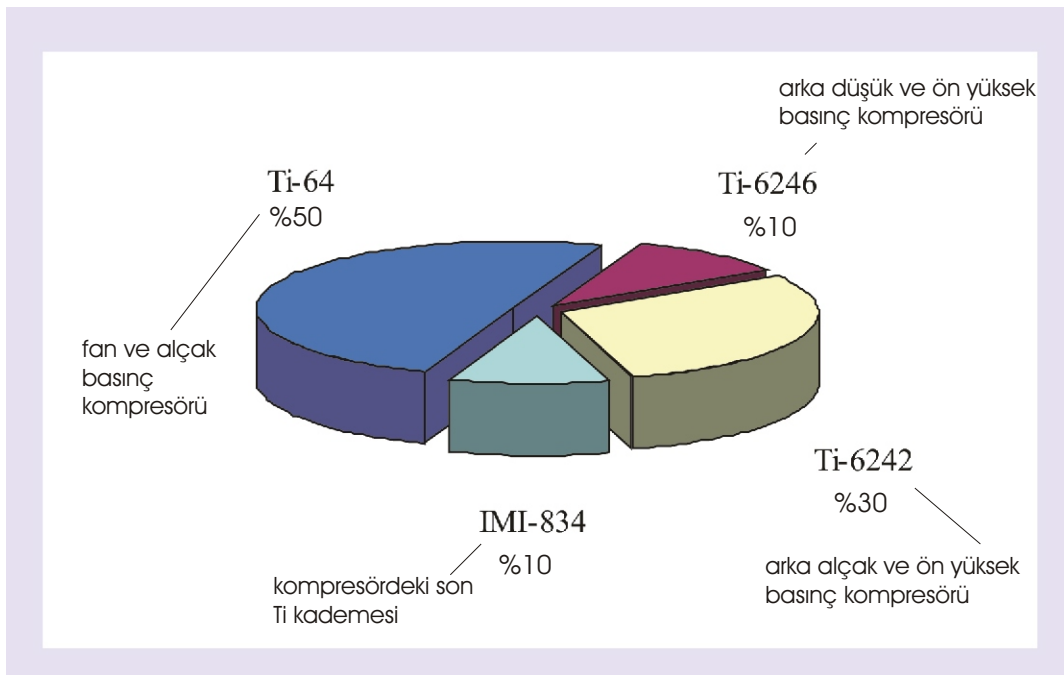
#### Titanyumun İşlenebilirliği

Proses olarak hassas döküm, izotermal dövme, toz

metalurjisi, titanyumdan imal edilen parçaların maliyetlerini düşürmek için tanıtılsa da, karmaşık yapıya sahip titanyum parçalar hala klasik işleme yöntemleri kullanılarak imal edilmektedir. Uçak motoru parçaları için torna, freze ve delik işleme en önemli üretim prosesleridir. Titanyum kimyasal olarak oldukça tepkimelidir ve bundan dolayı işleme esnasında kesici takıma kaynama eğilimi gösterir.



Şekil 4. Titanyum Alaşımlarının Sıcaklık/Gerilme Oranları [9].



Şekil 5. Motordan Beklenenlere Bağlı Olarak Ti-Alaşımı Cinslerinin Kullanım Oranı [6].

Bu da takımda küçük kırılmalara neden olur. Düşük ısı iletkenliği takım ömrüne olumsuz etki eden takım ve parça temas noktasındaki sıcaklığı artırır. Ayrıca, orta sıcaklıklardaki yüksek mukavemeti ve düşük elastisite modülü işlenebilirliği güçleştirir.

Titanyum parçaların, ürünlerin çevre kirliliği oluşturmama özelliği, deniz altı ve üstü faaliyetlerde kullanımının temini, kükürt bileşimi içeren endüstriyel alanlarda, ayrıca diğer zor çevre koşullarında da kullanımını olanaklı hale getirmiştir. Bunun nedeni bu özelliklere sahip hiçbir metalin galvanitik korozyonu hızlandırıcı etkiye sahip olmamasıdır.

Ancak titanyumun en önemli sorunlarından biri, hidrojenin neden olduğu kırılabilirlik. Buna titanyum için hidrojen kırılabilirliği adı verilir. Kaynak işleminde argon veya helyum koruyucu soy gaz atmosferi dışında kalan yüzeylerde oluşan kaynak bölgeleri adeta cam gibi kırılabilir bir hal almaktadır. Güvenilir zararsız metotlarla,

hidrojen miktarını ölçmek gerekliliği vardır. Bu gama ışınları ile soğuk nötron yakalayarak analiz edilebilir (PGAA). Bu ölçümlerde; tolerans  $170 \pm 50$  mg/kg olup, 215 mg/kg hidrojen değeri kabul edilebilir sınır olarak bilinmelidir [12].

#### Yüksek kesme sıcaklığı

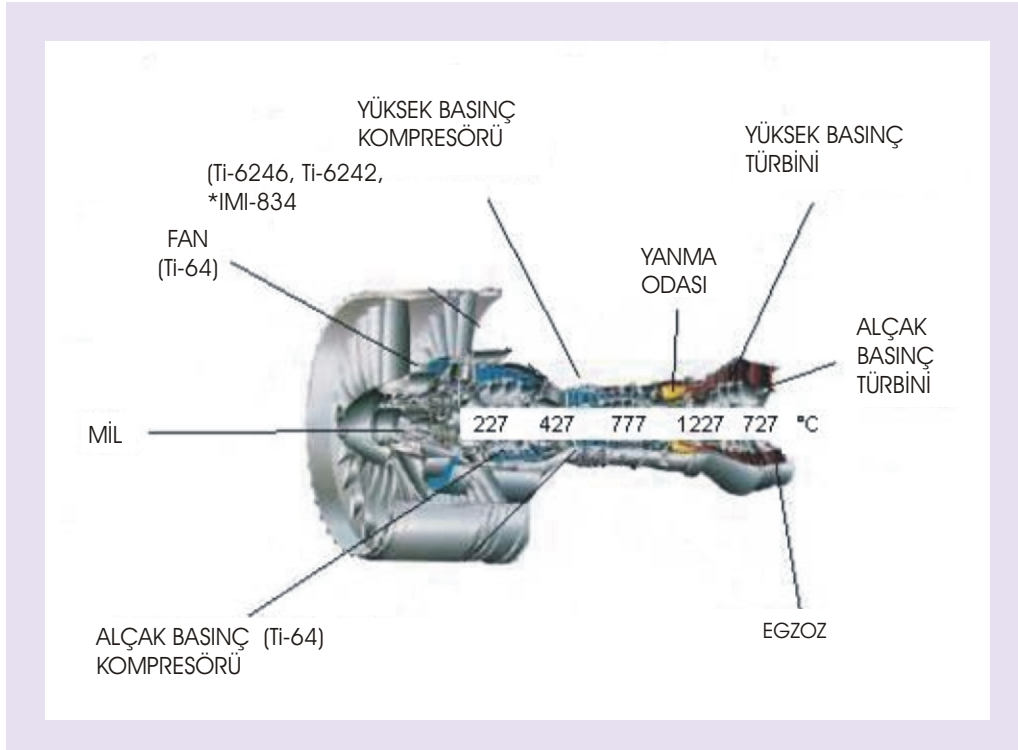
Titanyum alaşım Ti-64'ü işlerken oluşan ısının %80'i takıma geçer. Çünkü ısı düşük termal iletkenlik yüzünden (çeliklerin 1/6'sı kadar) talaş tarafından atılamaz. Bu yüzden kesme sıvısı kullanımı gerekmektedir.

#### Yüksek kesme gerilmeleri

Titanyumu işlerken oluşan kesme kuvvetleri çelikleri işlerken oluşanla benzerlik gösterir. Ancak daha yüksek mekanik gerilme oluşur.

#### Tırlama

Düşük elastisite modülünün neden olduğu tırlama



Şekil 6. Yüksek Bypass Oranlı Ticari Uçak Motoru Bölümleri ve Belli Kesitlerdeki Sıcaklık (°C) Değerleri [1]. \*Son Gelişmeler IMI-834 Üzerinedir.

özellikle finiş işlemlerde üstesinden gelinmesi gereken diğer önemli problemidir.

### Takım malzemeleri

Titanyum alaşımları hemen hemen tüm takım malzemeleri ile kesme sıcaklığı 500°C aşıldığında kimyasal olarak reaksiyona girer. Talaşların takımlara sıvanması takımında ciddi aşınmalara neden olur [3].

Son yıllarda titanyum malzemesinin işlenmesinde sıvı nitrojenle soğutma yapılmaktadır. Titanyumun işlenmesinde sıvama nedeni ile takımın kısa takım ömrüne sahip olması ve yüksek kesme hızlarında çalışamaması nedeni ile gündeme gelen araştırma çalışmaları yoğun bir ortamda devam etmektedir.

## Uçak Motorlarındaki Uygulamalarda Kullanılan Titanyum Malzemeler için Gelişmeler

Titanyum parça, temin edilme kaynağı, üretim yöntemi, bileşenlerinin özellikleri ve bilinen diğer etkilerinin eniyilenme (optimizasyon) ihtiyacındadır. Malzemenin ham halinden, motor parçası olarak kullanımına kadar belirtilen geometrinin oluşturulmasında birçok proses adımı vardır. Bu prosesler, maliyet ve işlem süresi azaltılmaya yönelik olmalıdır. Eniyileme, maliyet ve çevrim süresidir. Bundan başka her yeni malzeme, proses adımlarının geliştirilmesi, uydurulması ve yeniden gözden geçirilme süreçlerini içerir. En son olarak proseslerin değişmez hale getirilebilmesi, malzemenin hacimsel yapısı üzerinde de kontrol edilebilir hale getirilmelidir. Proses adımları ham parçanın üretimi, parçanın kaynatılabilirliği ve mekanik işlem proseslerinin en ideal şartlarda sağlanması ile sabitleştirilecektir.

Rotorun, tasarım kavramına uygun itiş gücüne ve parça ömür değerlerini artırma talep ve ihtiyacı,

mühendisleri daha ağır parçalar tasarlamaya zorlamaktadır. Fakat yeni tasarım ve üretim teknolojileri ile bu sorunları aşmak kolay hale getirilmiştir. Örneğin diskin iç çapının artırılması buna bir örnektir. Gelecek nesil uygulamalarda titanyum takviyeli lifli kompozitler (Ti-MMC) gündeme gelecektir. Bu tür malzemelerin farklı yönlerdeki yüklemelere dayanıklı olarak tasarlanma gerekleri vardır. Yine bu konudaki güçlü yüksek araştırma-geliştirme maliyetleridir. Rekabet edilebilir üretim maliyetlerinin gerçekleşmesi, muayenelerin tahribatsız hale getirilebilmesi ve güvenilirliğe bağlıdır.

Kanatçık ve diskin iyileştirilmesi için tek parçadan yapılmış bütünlük kanatçıklı rotor (blisk, Şekil 7) gereksinimi gündemdedir. Bütünlük kanatçıklı rotor (IBR) diskin ve kanatçığın tek parçada oluşturulmuş halidir. Günümüzde zorunlu tasarım kavramıdır. Çünkü, geleneksel rotor tasarımında iki parçadan oluşan rotor-kanatçık ikilisi kabul edilemez basınç yüzeyleri (kanatçık rotor slotu arasında) oluşturduğu, temas yüzeylerindeki gerilmelerin çok yüksek olması nedeniyle, bu koşulun telafisini gündeme getirmiştir. Bunun yanında blisk denilen tek parçalı yapı, en ufak bir hasarda tamamı ile atılıp yenisinin takılmasını gerektirmektedir. Bu dezavantaj da göz ardı edilemez. Bunun nedenleri ise kanatçıklarda yüksek çevrimli yorulma ve disklerde düşük çevrimli yorulma oluşmasıdır. Bu nedenlerle bundan sonraki adım uygun bir kaynak prosesi (argon altında doğrusal sürtünme kaynağı) ile kanatçığı diske yapıştırmaktır. Böylece bütünlük kanatçıklı disk gündeme gelmiştir. Bu proje AB ülkeleri arasında bir araştırma projesi olarak da yürütülmektedir.

Titanyumun tutuşmasından kaçınmak için Ni-alaşımı süperalaşımları stoper olarak kullanıp rekabet edebilir, tutuşmayan titanyum alaşımı üretmek ihtiyacı önemli bir beklenti oluşturmaktadır. Modern uçak motorlarının, yüksek





Şekil 7. Doğrusal Sürtünme Kaynağı ile İmal Edilmiş Blisk Örneği [2].

basınç kompresörlerinde sıklıkla titanyum tutuşması gündeme gelebilmektedir. Bu nedenle diğer ölçümlerin yanında (tutuşmayı motor içerisinde tutabilmek için motor kaplaması gibi) tasarımcılar Ni-esaslı süperalaşımı sabit kanatçıklarda tutarak aksenal yönde bir engel teşkil etme eğilimindedirler. Bu, titanyumun sıcaklık dayanımını arttırmak için ağırlığı arttırma anlamına gelmektedir. Motordaki titanyum tutuşma problemini engellemek için daha uygun bir yol ise, referanslarda bahsedilen yanmaya dayanıklı titanyum alaşımları kullanmaktır.

Diğer bir ihtiyaç konusu da bazı nikel esaslı süperalaşım yerine düşük yoğunluklu yeterince sıcaklık dayanımı sağlayan malzemeye olan taleptir. Motor tasarımında ağırlık azaltmak her zaman ana amaçtır. Bu nedenle titanyum alaşımları tasarımcılar için her zaman ilgi odağı olmuştur. Titanyumun sınırlı sıcaklık dayanımı özelliği bu kısıtları iyileştirme çabalarını güdülemiştir. Bu titanyum alüminitleri (TiAl alaşımları = titanyum alüminyum intermetalik malzeme) gündeme getirmiştir [6]. Titanyum alüminatlar mükemmel mekanik özelliklere sahip oldukları için, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaları konusunda son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu alaşımların üstün özellikleri arasında, hafif olmaları (3.7-3.9

g/cm<sup>3</sup>), yüksek spesifik mukavemetleri (mukavemet/ağırlık oranları), iyi oksidasyon ve yanma dirençleri ve yüksek elastisite modülleri sayılabilir [7]. Birçok yeni malzeme gibi, titanyum alüminitlerin (TiAl) işlenmesinde hala önemli zorluklar vardır [4]. Ancak, uçak motorları açısından ek yeni araştırmaları gerektirmektedir. Malzemenin yumuşaklığı uygulamalarda yeterli midir? Tasarım mühendisleri buna nasıl razı edilebilir? Üretim yöntemleri maliyetleri arttırmadan nasıl iyileştirilebilir? Bu soruların cevap bulması ile birlikte titanyum alüminitlerin uçak motorlarında önümüzdeki dönemde kullanılması beklenmektedir [6].

## SONUÇ

Makalede uzun zaman diliminde titanyuma bir bakış yapılmıştır. Gaz türbinli uçak motorlarında bazen çok güç ama gerekli basitleştirmelerin ve geliştirmelerin odak noktası olarak titanyuma geçiş ön görülmektedir. Çünkü titanyumun düşük yoğunluğu ve bu yoğunluğa rağmen gösterdiği yüksek sıcaklık performansı ile uçak motorlarında daha yıllarca güvenle kullanılacağını göstermektedir.

Önümüzdeki yıllarda gaz türbinli uçak motorlarında önemli temel değişiklik beklenmemesine rağmen, performanslar, daha iyi tasarımlarla arttırılma eğilimindedir. Bu da malzeme, imalat ve kaplama teknolojilerindeki ilerleme ile sağlanabilecektir.

Malzemenin gelişimi, mukavemet/ağırlık oranının eniyileşmesi ile, metallerarası bileşik ve fiber matrisli polimerler, metal veya seramik matrisli kompozitleri gündeme gelmiştir. Bunlar arasında yalnızca polimer matrisli kompozitler kullanıma geçmiş olmasına rağmen, diğerlerinin başarılı motor test sonuçları, aday malzemelerin hala geliştirilmeleri gerekliliğini gündemde tutmaktadır. Yüklemeler karşısında değişken davranışları hala tartişılır durumda olup fiyatları rekabet edilebilir düzeyde değildir. Maliyet nedenleri ile Ti-MMC gibi malzemelerin herhangi bir tahribatlı muayene tekniğinden geçirmek hayli zordur.

Motor üreticileri arasındaki ana rekabet unsurları, maliyetleri ve çevrim zamanını düşürmek, buna paralel olarak, performans, verim ve kalite unsurunu ön plana çıkarmaktır. Bu, üretim teknolojisinde büyük hamleler gerektirmektedir. Geleneksel monolitik titanyum ve nikel alaşımlardaki gelişmeler oldukça kısıtlı kalmiştır.

Titanyum alaşımlarının motordaki kullanımı daha uzun yıllar sürecek gibi görünmektedir. Kompozit malzemelerin henüz ulaşılabilir ekonomik değerde olmaması ve uzun dönemdeki test sonuçları beklentilerinin belirsizliğini sürdürmesi çözümleri bekleyen konulardır.

## KAYNAKÇA

1. **Anık S., Sütataç M.**, "Titanium ve alaşımlarının kaynak kabiliyeti" Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 27, sayı:318, Temmuz 1986
2. **Helm D., Roder O., Lütjering S.**, "Recent Developments in the Production, Application and Research of Titanium

- Alloys in Germany", MTU Aero Engines Munich, Germany
3. **Ezugwu E.O.**, "Titanium Alloys and Their Machinability A Review", Journal of Materials Processing Technology, Oct 1995.
4. **Ezugwu E.O.**, "Key Improvements in the Machining of Difficult-To-Cut Aerospace Superalloys", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Dec 2004.
5. **Erdem M. S., Akmandor S.**, "Uçak Motoru ve Elektrojen Gruplarındaki Gaz Türbini Teknolojisindeki İlerlemeler, Malzeme, Yüzey Teknoloji ve İmalat Süreçlerindeki Gelişmeler Bölüm 1-2" Mühendis ve Makina Dergisi, Ocak-Şubat 2004 sayı 528-529.
6. **Esslinger J.**, "Titanium in Aero Engines" MTU Aero Engines Munich, Germany <http://www.mtu.de>
7. **İpekoğlu G., Koçak M., Çam G.**, "Difüzyon Kaynaklı TiAl Alaşımının İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Kaynak Teknoloji IV.Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, Yayın No: E2003/339, Ekim 2003, Kocaeli.
8. **Pototzky P., Mailer H.J., Christ H.J.**, "Thermomechanical Fatigue Behavior of the High-Temperature Titanium Alloy IMI 834", Metallurgical and Materials Transactions, volume 29A, Dec 1998.
9. **Miller S.**, "Advanced Materials Mean Advanced Engines" Materials World, vol. 4, 1996 (<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=111>)
10. "Titanium Industries, INC." <http://www.titanium.com>
11. "Engine Weight Model" <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K2/airplane/turbwft.html>
12. "PGAA" <http://nuclear.ucdavis.edu/>