

# UÇAK MOTORU VE ELEKTROJEN GRUPLARINDAKİ GAZ TÜRBİNİ TEKNOLOJİSİNDEKİ İLERLEMELER, MALZEME, YÜZEY TEKNOLOJİLERİ VE İMALAT SÜREÇLERİNDEKİ GELİŞMELER (Bölüm 1)

**Mümtaz Salih ERDEM**  
Dr. TEI-TUSAŞ Motor San. A.Ş.

**İbrahim Sinan AKMANDOR**  
Prof. Dr. ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

## GİRİŞ

odern uçak motorları, en yüksek güvenilirlik, en az ağırlık, en yüksek performans, ekonomiklik ve uzun süre dayanıklılık ölçütlerini de göz önünde bulundurarak üretilmektedirler. Aynı zamanda, gürültü ve çevre kirliliği problemlerini de aşmada büyük mesafeler katedilmiştir.

Yolcu başına katedilen yol uzunluğu dikkate alınarak otomobil motorunun (içten yanmalı-pistonlu) yakıt tüketimi ile modern uçak motorunun yakıt tüketimi karşılaştırıldığında, türbinli motorlarınkinin daha düşük olduğu görülür. Güvenilirlik açısından bakıldığında ise, ilk nesil ticari turbojetlere göre, bugünkü türbinli motorları 10 kat daha güvenilirlerdir. Nedenlerden biri, kalite muayene ve bakım süreçlerinde yaşanan büyük ilerlemedir. Modern turbofan motorlar, uçuş-misyonlarına bağlı olarak 10.000-20.000 uçuş saat, ana bakım yapmadan ve parça değiştirmeden uçabilmektedir. Bugünün 3. kuşak turbofan motorları (PW 4000, trent, GE 90) ise, her milyon uçuş saati için 3 kez veya daha az bakım süreleri hedeflemişlerdir. Bu gelişmelerin bir sonucu olarak, 20 yıldan bu yana, çift motorlu jetlerin uzun mesafeli okyanus aşırı uçuşlarına izin verilmiştir. (Şekil 1-2).

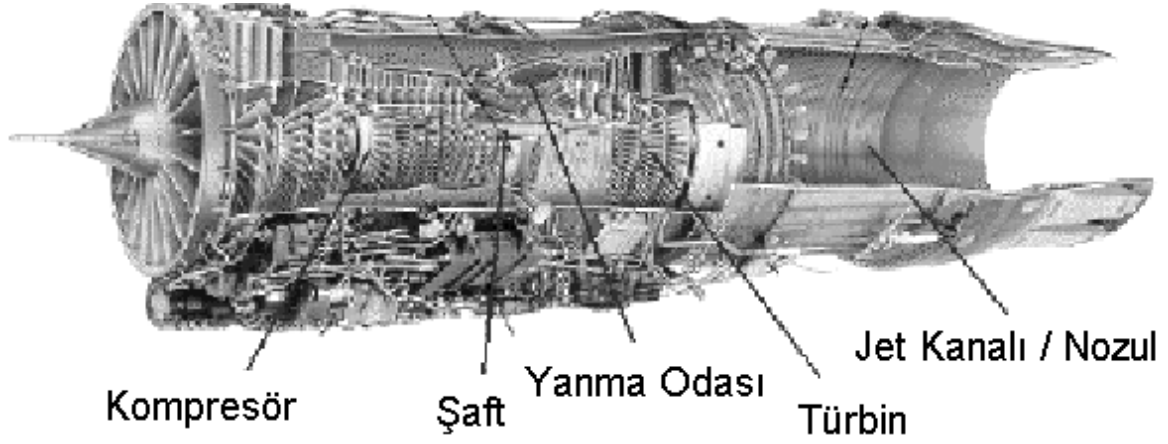
Bu motorların üstünlüklerini sağlayan ana etkenler aşağıda sıralanmıştır:

- İki ve/veya üç milli motorlarla, bypass oranının 5'i aşması,
- Toplam basınç oranının 40 veya daha üzerine çıkması,
- Yanma sıcaklığının 1850 K' den daha yukarıya çıkması.

Bu değerleri daha da geliştirebilmek için, ısıl verim ve kompresör-türbin çarklarının veriminde artış sağlamak ve tasarımın temel öğelerinde büyük yenilikler yapmak gerekir. Örneğin,

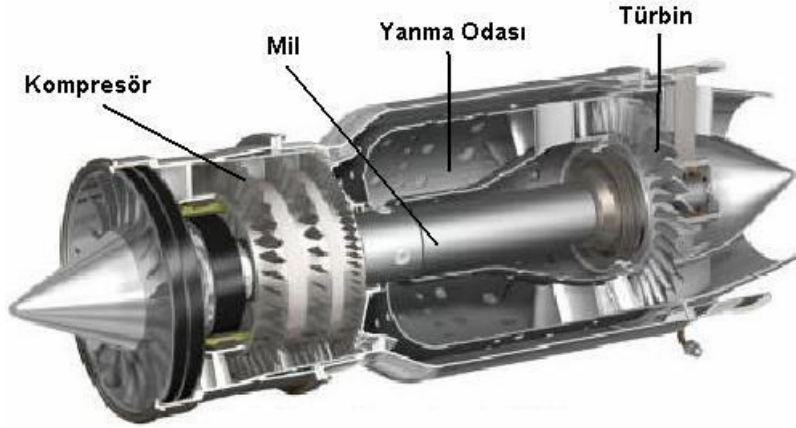
- Bypass oranını 5'lerden 12'lere arttırmak için, daha hızlı dönen transonik-süpersonik fan ile, bu oransal değişimi sağlayan gelişmiş düşük basınç türbin tasarımları gerekmektedir.
- Egzoz gazındaki ısıl enerjiden daha çok yararlanılmasını sağlayan yeniden kazanım (recuperative) ısı eşanjörü ile kompresör giriş ve ara kademeleri arasına konulan soğutucuların (inter-cooler) kullanımı gerekmektedir.

Tasarımda arzulanan performans çıktıklarına ulaşabilmek için, motor içi gaz akış ve termodinamik davranışın, bilimsel olarak iyi çözümlenmesi gerekmektedir. Yeni fan ve düşük basınç türbin tasarımlarına ait ilk prototiplerden edinilen ölçüm sonuçları, bu yeni komponentlerin, bu on yılın sonlarında devreye girebileceklerini göstermektedir. Isı eşanjörü ve kademe arası soğutucuların ilavesi ile verim artışı sağlayacak Ar-Ge projeleri üzerinde de yoğun olarak çalışılmaktadır [1]. Uçak motorlarına ait olupta, hali hazırda ticari uygulama safhasına aktarılan projelerin önemli bir bölümü, malzeme, üretim teknolojileri, yüzey kaplama, temizlik, süper finish, v.b. teknolojileri ile ilgilidir.



Şekil 1. Motor ve Önemli Bölümleri(6)

Örneğin, 1960'ların başlarında geliştirilen titanyum alaşımlar, geniş kesitli fan kanatçıklarında ve yüksek basınç kompresör rotorunda kullanılmıştır. Daha çok güç ve verim istihsal etmek için, türbin giriş sıcaklığı sürekli arttırılmaktadır. Bu sıcaklığın kanatçık malzemesinin ergime sıcaklığını aşmaması için, etkili iç soğutma sistemleri geliştirilmekte ve kanatçık malzeme dokusu olarak da, çatlak ilerlemesine dirençli, tekli kristal yapıya geçilmektedir. Dönel kanatçıkların üzerindeki ısı kalkanı görevi gören kaplamalar da, oksidasyona karşı dayanımı arttırmıştır.



Şekil 2. Bilgisayarla Simule Edilmiş Bir Motor ve Önemli Bölümleri(6)

Motor üreticileri arasındaki rekabet genelde maliyet-performans-verim üçgeni arasında geçmektedir. Motor performansı ve verim arttırılmaya çalışılırken, aynı zamanda maliyetlerde aşağı çekilerek, ilk bakışta çelişir gibi görünen bu hedefler arasında, bir tasarım döngüsü yaşanmaktadır. Çelişen veya en azından birbirini etkileyen bu hedeflerin tümüne varım, geliştirilmiş tasarım, daha iyi malzeme ve gelişmiş üretim süreçleri ile olanaklıdır. Üretim maliyetleri, motorlarda kullanılan parça sayısı azaltılarak aşağıya çekilmektedir. Bu hedef ancak daha iyi malzeme ve üretim teknolojileri ile gerçekleştirilebilir.

## MALZEME TEKNOLOJİSİ

Motor malzemeleri, iyi işlenmeyi sağlayacak mekanik özellikleri ve özel mukavemet değerleri ile tanımlanmaktadır. Malzemenin kendisi, malzeme üretim ve işleme fabrikaları, yetkili havacılık otoriteleri tarafından sıkı bir şekilde kontrol edilmekte, onaylanmakta ve belgelendirilmektedir.

### Geleneksel Motor Malzemeleri

Günümüzde yaygın olarak kullanılan malzemeler; Ti-alaşımları, Ni-alaşımları (süper alaşımlar) ve yüksek mukavemet çeliğidir. Kompozit, intermetalik vb. gibi malzemelerin

payı şimdilik düşüktür. Çelikler genellikle mil ve dişli gruplarında kullanılırken, alaşımlar daha çok kompresör, türbin ve yanma odalarında kullanılmaktadır.

### Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımları, daha çok kompresör parçalarında kullanılmaktadır. Düşük özgül ağırlıkları ve düşük sıcaklık kapasiteleri vardır. Ti ( $\mu + b$ ) alaşımlar için, faz  $\mu$  dengeleyiciler (alüminyum gibi) ve b fazı dengeleyiciler (Molibden ve Vanadyum gibi) çalışma sıcaklığının optimum seviyelere çıkmasını temin etmekte. Dövme, özellikle temiz dövme, b dengeleyicilerini taşıyarak daha ince moleküler yapı ( $\mu + b$ ) oluşturur. Bu mikroyapı, statik ve dinamik mukavemet özellikleri olarak eniyi dengeyi temin etmektedir.

Ti alaşımı olarak Ti6 Al 4 V (Ti 64), motor ve uçak iskeleti uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti 64; düşük sıcaklıkta yüksek mukavemet, mükemmel mekanik işlenebilirlik ve kaynak edilebilme özelliklerini taşımaktadır. Ti64 dövme, hassas döküm, levha metal (sac) olarak 1975'den beri stator parçalarında ve kompresör dış cidarlarında kullanılmaktadır.

Ti6242 ve Ti6246 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. Adı geçen alaşım, 450°C'nin üzerinde, diğer titanyum alaşımlarından daha iyi özellikler gösterir. Fiyatı Ti64'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 temelli alaşımlar (süper alaşımlar) geçen 10 yıllarda kendilerinden beklenen özellikleri mükemmel bir şekilde yerine getirmişlerdir. Ancak bu malzemelerin gelecekteki gelişmeleri oldukça sınırlı görülmektedir. Geliştirilmeleri yüksek miktarda ek maliyeti gerektirmektedir. Bu nedenlerle yerlerine yeni malzemeler geliştirmek amacı ile deneme çalışmaları yapılmaktadır.

### Nikel Esaslı Alaşımlar (Süper Alaşımlar)

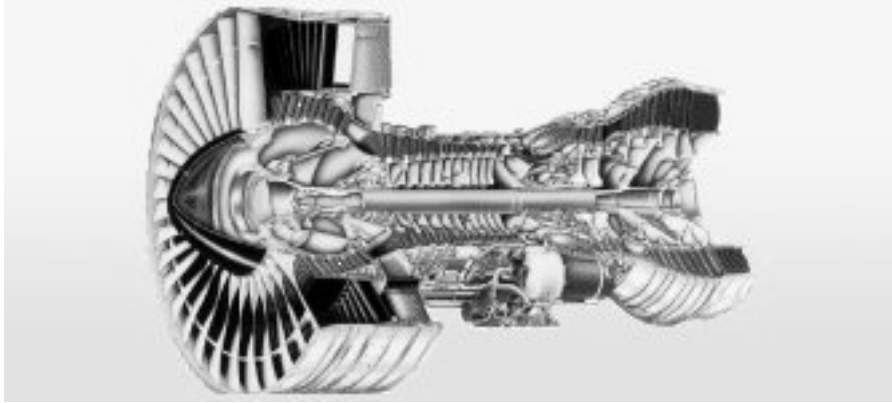
Nikel esaslı alaşımlar (süper alaşımlar), motorun sıcak bölge parçaların imalinde kullanılmaktadır. Ti-alaşımları için çok sıcak bölgeler olan yüksek basınç kompresörünün arka kademelerinde kullanılır. Yanma odasında kullanılan özel sac alaşım saclar (Hastelloy X - C263), düşük mukavemet, oksidasyona dayanım, şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilme özellikleri olan malzemelerdir. Türbin uygulamaları için ise, esas olarak 2 grup süper alaşım söz konusudur : birincisi dövme ile üretilir ve bu malzemeler diskler ve ringler için kullanılır. İkincisi dökümdür ve bu malzemeler, sabit veya hareketli kanatçıklarda kullanılır. Sıcaklığa dayanımlarını iyileştirmek için farklı mukavemet arttırma işlemleri gerekir, bunların başlıcaları;

- Kobalt katarak solusyonu katılaştırmak, krom ve ısıya dayanıklı - tungsten gibi - molibden gibi - metallerle karışımı zenginleştirmek gerekmektedir.
- Sertleşmeyi hızlandırmak için metalik g"-Ni3 (Al, Ti) ve veya g"Ni3Nb fazını ortaya çıkarmak. Bu nedenle ısıya dayanıklı süper alaşımlara %10'dan fazla (ağırlık olarak) Al+Ti veya az miktarda Nb katmak gerekmektedir.

Nikel alaşımlar diskler ve dönel bilezikler için kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygını IN718'dir ve yüksek basınç kompresör ve türbinin arka kademelerinde kullanılmaktadır. Bu süper alaşımların, 750°C'nin altında iyi dinamik mukavemet değerleri bulunmaktadır. Waspalloy yüksek sıcaklık özellikleri ile IN718 ile karşılaştırılabilir. Ancak Waspalloy mikroyapısı çok kritik metalürjik davranışlar sergiler. Dövme olarak üretildiğinde,

homojen, ince dağılımlı mikroyapı eldesi hemen hemen olanaksızdır. Bu nedenle Waspalloy'un işleme ve kaynak özellikleri kısıtlıdır. Waspalloy'un yerine, yüksek sıcaklık kabiliyetleri nedeni ile, yalnızca toz metalurjisi teknolojisi ile elde edilen Udimet700, ReNe95 veya IN100 gibi malzemeler kullanılmıştır. Bazıları, yüksek sıcaklıkta çok yüksek mukavemet değerleri elde etseler de, kırılmaya mukavemetleri zayıf kalabilmektedir. Önümüzdeki 10 yıllık dönemde, özellikle disk uygulamalarında, sönümlenmiş Waspalloy veya Udimet 720 Li (Li : düşük içselbağ) malzemesinin, dövme ve döküm olarak kullanıma daha yatkın olacağı düşünülmektedir (1) . Bu ilerleme, malzemenin daha yüksek saflıkta ingot olarak temini, daha homojen bir yapının oluşması, mikroyapıdaki segregasyonun önlenmesi, termomekanik işlem ve ergime parametrelerinin en iyileşmesi ile başarılabilecektir. Halihazırda ise, Udimet 720 Li gelişmiş bir malzeme olarak, mekanik işlem gereksiz disk uygulamalarında kullanılabilir (2) . Maximum kullanım sıcaklığı 730°C'ye ulaştığı için, IN 718 ile karşılaştırıldığında, Udimet 720 Li'nin +80°C 'lik bir çalışma sıcaklığı üstünlüğü vardır. Ancak malzemenin fiyatı oldukça yüksektir.

Özet olarak, U720 Li alaşımı ile yüksek sıcaklık mukavemeti açısından karşılaştırılabilecek malzeme yoktur. Ticari motorlarda kullanımı makul fiyatlarla cazip hale getirilmektedir. Türbinlerdeki tüm sabit ve hareketli kanatçıklar (vane + blade), döküm olarak elde edilmektedir. Dövme malzemenin kullanılmamasının nedenleri, termomekanik (ısıl-mekanik) özelliklerinin, sürünme mukavemetinin ve bası altında kırılma mukavemetini taşıma özelliklerinin döküm malzemeye göre daha düşük kalmasıdır. Çünkü, kanatçıklar çok yoğun ve aşırı yüksek gaz sıcaklıklarına ve dönel yüklere maruzdur.



Şekil-3 Yeni Malzemeler ve Kullanım Yerleri

Son yıllarda farklı çalışma sıcaklıklarına sahip çeşitli alaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlilerinden IN718 süperalaşımdır. Dökümü, polikristalli ve eşeksenli bir mikroyapıya sahiptir. Günümüzde IN718, sıcaklığın türbinlere göre daha düşük olduğu düşük basınç kompresörünün arka kademelerdeki sabit ve hareketli kanatçıklarda uygulanmaktadır. IN 100 ise yüksek sıcaklık mukavemetine sahip (IN 713 alaşımına göre

yaklaşık çalışma üst sınırı +30°C ve üstü), düşük yoğunluklu ( $\rho = 7.75 \text{ g/cm}^3$ ) bir özelliğe sahiptir. Bu alaşımın IN 713 ile bir başka farkı, katılaşmanın kontrol edilebilmesidir. Söz konusu malzeme, yönlü katılaşmalı (directional solidified) kristal yapısına sahipse, tane sınırları eşeksenli olarak merkezkaç kuvvet yönünde olmakta ve sürünme mukavemet göstergesi indirgenmektedir. Tek kristalli yapıda ise, tane sınırları yoktur ve bu nedenle en iyi sürünme mukavemeti özellikleri gösterir. Yönlü katılaşmalı (DS : directional solidified) ve tek kristalli (SX : Single Crystal) yapılanmalar için, döküm teknolojilerinde özel katılaşma teknikleri geliştirilmiştir. Şu anda bu malzemelerin en gelişmişleri tek kristalli olan PWA 1484 veya CMSX10'dır. Yüksek yoğunluk ( $\rho = 9 \text{ g/cm}^3$ ) ve IN 100'e göre +100 °C'lik bir sıcaklık üst sınırına sahiptir. Parlak bir ürün olarak ticari kullanıma geçme sürecindedir.

Yeni malzemelerin geliştirilmesi, sıcaklık ve mukavemet özelliklerinin daha da iyileşmesine odaklanmıştır. Bunlar Ti ve Ni bazlı süper alaşımlar gibi kompozit ve metal bazlı (intermetallic) malzemelerdir. Bu yeni malzemelerin motor üzerindeki kullanım yerleri Şekil 3'te verilmiştir.

### İleri Teknoloji Malzeme Yapıları

Önümüzdeki yıllarda motorlarda kullanılması muhtemel 2 grup malzeme vardır. Bunlar

- Fiber takviyeli kompozitler,
- Metal veya seramik matrisli malzemelerdir. Metallere arası bileşik (intermetalik) malzemeler arasında TiAl seçeneği en çok kabul görendir. ODS (Oxide Dispersion Strength=oksid dağıtıcılı, güçlendirilmiş) süper alaşımlar - gelecek nesilde önemleri azalmış gibi gözükmektedir.

Açıkça görülmektedir ki, geleneksel döküm, dövme titanyum ve nikel alaşımların önümüzdeki dönemde de kullanılmasına devam edilecektir. Yukarıda sözü geçen geliştirilmiş malzemeler ise henüz güvenilirliklerini temin edememişler ve/veya maliyetleri düşürülebilmiştir. Motor üreticileri, gelişmiş malzemelerin kullanımı üzerinde söz sahibidirler. Dolayısı ile, ne zaman kullanıma girecekleri belirgin değildir. Bu nedenle geliştirilmiş malzemelerin, geleneksel malzemelere bir alternatif teşkil edilebilmeleri uzun zaman alacağı benzetilmektedir.

### Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

PMK'ler (Polimer Matrisli Kompozitler: Polymer Matrix Composites), yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve maliyetleri ile karmaşık şekilli parçalar için önemli bir seçenek haline gelmiştir. Gelişmiş PMK'ler 200°C üzerindeki sıcaklıklarda bile kullanılabilme özelliğine sahiptir. Genellikle lif (fiber) malzemesi karbon, cam veya aramid ( $\phi = 8 \div 15 \mu\text{m}$ ) 'dir. matris ise epoksi/reçine'den oluşmaktadır.

1975'den beri PMK'ler jet motorunun fan ve bypass kanalı-kovanı gibi yerlerinde, paneller şeklinde kullanılmaktadır. 80'li yıllarda kullanım alanı dahada genişlemiş ve pek çok sayıda yeni PMK parçası devreye girmiştir; Ara halkalar (Spacer-ring), ses yalıtım tabakası (akustik linner), basınçlı hava lüleleri (bleed nozzles), düşük basınç kompresörü iç kovan cidarları (linner shroud) ve hava giriş/çıkış kanalı yönlendiricilerin (nose cones) imalatları yapılarak kullanılmaya başlanmıştır. Artık CF6-80 ve CFM 56 motorlarında fan çıkış kılavuz kanatçıkları polimer matrisli kompozittir. Parçalanarak ufalanıp dağılmasına engel olabilmek için ise kanatçıkların hücum kenarları (leading edge), sac levha (köşebent) veya bantlarla kaplanmaktadır. Günümüzde fiberlerin (liflerin) kalitesinin gelişimine bağlı olarak 3 boyutlu ön şekillendirilerek dikişleri yapılabilmektedir.

Yüksek kalitede PMK parçaları üretmek için yeni bir yöntem de reçine enjeksiyonlu kalıplama (RTM - Resin Transfer Moulding) yöntemidir. Bunun adımları ise; fiber kesimi, fiberin ön şekillendirilmesi ve birleştirilerek, kapalı kalıba konulması reçine enjeksiyonu sağlanması ve parçanın bekletilerek sertleştirilmesidir.

Alçak Basınç Türbin Kanatçığı-  
Polimer Matrisli kompozit

Ti-Dövme Kanatçık



PMK teknolojisinin en önemli örneklerinden biri olarak GE90 motorunun 1000 mm uzunluğundaki fan kanatçıklarını bu yöntemle imali söylenebilir. Gelecekte de pek çok sayıda PMK motor parçası kullanılarak, maliyeti ve ağırlığı azaltıcı yönde olumlu katkılar yapacağı tahmin edilmektedir. (Şekil-4). PMK'lerin ana hedeflerinden biri daha yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkabilmek olacaktır.

### Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal Matrisli Kompozitde kullanılan matris malzemeleri, Alüminyum, Bakır, Demir, Magnezyum, Nikel ve Titanyum'dur. Yüksek mukavemetli Ti- esaslı kompozitler; geleneksel Ti-alaşımlarına göre %50 daha hafif ve elastiklik modülleri de daha yüksektir.

Ti-metal matrisli kompozit diskler veya halkalar 'ın üretimi aşağıdaki ana adımlardan oluşur :

- Lif (fiber, genellikle silisyum karbür SiC,  $\text{Ø} = 0,1 \text{ mm}$ ) proses esnasında fiber ile matris arasındaki reaksiyonu önlemek için karbonla kaplanır.
- Lifler, plazma veya buhar çökeltme (PVD, Physical Vapor Deposition) yöntemi kullanılarak kaplanır.
- Lifler bobin şeklinde sarılır.
- Lifler sıcak izostatik presleme ile birleştirilir.
- Güçlendirilmiş lifler, Titanyum tozu ile HIP yöntemi ile birleştirilerek bilezik veya disk üretilir. kompozit ring veya disk'e HIP yöntemi ile katılır.

Bu metot kısaca kanatçıklı ring veya çember (blings, bladed rings-) olarak bilinen motor parçasına ve kanatçıklı disk (blisk, bladed disk, integral bladed) parçasının ağırlığını ve rotor ataletini azaltmak açısından yararı olacaktır.. Uygulama olarak, ABD'de kanatçıklı ring'ler

(çap = 400 mm) ve diğer metal matrisli kompozitler (mil, fan ve sabit kanatçıkları), prototip olarak geliştirilen IPH TET programında başarı ile test edilmiştir. F414 motorundaki egzoz flaplerini kumanda eden biyel kolu bu tip bir üründür ve artık seri imalatına geçilmiştir(4). MTU motor firmasının Ti metal katmanlı kompozit malzemelere yaptığı çevresel sıvama test işlemleri devam etmektedir.

Günümüzde Ti-MMK teknolojisi iyi bir noktaya gelmiştir. Tahribatsız muayene teknikleri ile incelenen parçalarda iç çatlakların azaldığı görülmüştür. İmalat süreçlerin izlenebilirliğide üretilen parçanın kalitesini güven altına almaktadır. İmalat sürecindeki uzun zincir üretilen parçanın maliyetini çok olumsuz yönde etkilemektedir. Uygulama alanı bulan başka bir malzemede MoSi<sub>2</sub> takviyeli kompozit malzemedir ve uçak motorlarında, Ni esaslı süperalaşım yerine kullanılmaya başlamıştır. 1985 den beri HIP sıcak izostatik presleme prosesi ile üretilen bu malzeme, yüksek mukavemet değerleri, yüksek ergime sıcaklığı (2500 F), hafifliği ve çok düzgün tanecik dağılımı ile dikkat çekmektedir. Silisyum Nitrür ve Silisyum Karbürlü (MoSi<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ve SiC) katmanlı kompozit, düşük sıcaklık kırılma hızına ve ısıl genleşme katsayısının yüksekliğine bağlı olarak çok daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bugünkü maliyetlerle, Ti-MMK'lı bling (Bladed Ring) maliyeti, dövmeden işlenerek elde edilen bling'e göre 2 misli daha fazladır. Bu nedenle, bu tür pahalı malzemeler daha çok askeri motorlarda kullanılmaktadır.

### Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK,

### Ceramic Matrix Composite, CMC)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif oldukları (g = 1,5 - 3,0 gr/cm<sup>3</sup>) için oldukça çekicidir. Ancak kırılma hızları, monolithic seramiğin motor uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu nedenle lif takviyesi esas olarak SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, karbon, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya karışımdır (SiC + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Seramik katmanlı kompozitler 1000°C nin üzerinde birkaç yüz saat kaldıklarında basınç ve fiber malzemesine bağlı olarak 2 çeşit sorunla karşılaşmaktadır.

Fiber oksid, sıcaklığa oldukça dayanıklı olmasına karşın, sürünme özellikleri iyi değildir. Öte yandan, oksid olmayan fiber malzemelerinin (SiC) sürünme özellikleri iyi olmakla birlikte, koruyucu kaplama olmasına rağmen matris malzemesi ile reaksiyona girerek kimyasal değişime uğrayabilmekte, bu da yapısal sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle 1000°C'nin üzerinde SMK'lerin kullanımı sınırlıdır.. Monolithic seramik bu problemleri içermez, ancak onların kırılma hızı ve çatlama riski gibi sorunları vardır. Seramik matrisli kompozitler üzerinde sadece birkaç uygulama vardır. Alçak basınç türbin'e (LPT, Low Pressure Turbine) ait sabit parçalarda (egzoz gömleği, flapler, v.b.) kullanılabilir. SNECMA M88 motorunda egzoz flapleri (Kapakları) seramik katmanlı kompozit'tir. Yüksek sıcaklıktaki mükemmel mukavemet değerlerine bağlı olarak, uzay roketi motorları gibi kısa süreli uygulamalar için çok daha uygundur.

### Metallerarası Bileşik Malzemeler

TiAl ve Ti<sub>3</sub>Al gibi metallerarası (intermetalik) malzemelerin hafif olmaları ve artan çalışma sıcaklıkları, kullanım alanlarını gittikçe artırmaktadır. Geleneksel Ti ve alaşımlarıyla kıyaslandığında, beklenen süneklik değerine ulaşabilmek için kimyasal yapıda bir iyileştirme ile hedef, oda sıcaklığında uzama % 1,5-2 ve 750°C'de %3,5 olmalıdır.

TiAl parçaları şu anda hassas döküm yöntemi ile üretilmektedir.. Düşük basınç türbini (LPT) arka kademelerindeki kanatçıklar veya yüksek basınç kompresörü koruyucusu, geleneksel titanyuma göre çok daha sıcaktır. Döküm nikel alaşımlarına göre hafif olmasına karşın mukavemet değerleri iyidir. ABD'de TiAl kanatçıklar ve sabit kanatçıklar üzerinde yapılan deneylerde başarılı sonuçlar alınmıştır.

Ti<sub>3</sub>Al iç metal kapsüllü malzemenin performans olarak dövme teknolojisinde TiAl'e göre fazla bir avantajı yoktur. Daha ağırdır (g = 4,5 g/m<sup>3</sup>) ve prosesi daha karmaşıktır. Bu nedenle oldukça sınırlı bir ilgi alanına sahiptir. Ni-metallerarası bileşik malzemeler artık kullanılmamaktadır. Performans ve ağırlık olarak eksiklikleri vardır.

## Metal Püskürme Döküm (Metal Injection Moulding, MIM)

Metal püskürtme (enjeksiyon) kalıplama ve döküm tekniği (MIM) daha ufak ve hassas motor parçaları için geliştirilmiş ve seramik ve metal tozu kullanılarak uygulanmaktadır.. Teknolojinin esası toz metallurjisi yöntemidir.



	Metal Enjeksiyon Kalıplama	Geleneksel Dövme
Malzeme	U7 20 LI	IN 718
Proses	İşlem gereksiz	Dövme + ECM
Bağıl Yoğunluk %	99.95	100
Yorulma Mukavemeti %	95	100
Üretim Maliyeti %	~ 40 - 50	100
	<ul style="list-style-type: none"><li>İşlenmesi zor bileşikler dahi Metal Enjeksiyon Kalıplama yöntemiyle işlenebilir.</li><li>ECM: Elektro Kimyasal Frezeleme</li></ul>	

Şekil-5 Metal Enjeksiyon Döküm(MIM) kalıplama ile üretilen bazı ürünler ve geleneksel dövme yöntemi ile karşılaştırılması(1)

MPD uygulamaları arasında, bağlantı elemanlarını, hareket ileten kol ve çubukları, kamera, saat ve elektronik teçhizat malzemelerini sayabiliriz. Parça ağırlıkları, 0.1 gram ile 100 gram arasındadır. İnce taneli tozlar sayesinde, döküm sonucu net şekli tanımlanmış, sıkı toleranslı, çok kaliteli yüzey elde edilir ( $R_t = 1\mu m$ ). En iyi prosesleme parametreleri ile, malzeme yoğunluğunun 99,9 %'una ulaşıldığında, dövme malzemenin mukavemetinin %95'i aşılmaktadır. Kalan %5 eksiklik, malzeme seçimi ile giderilebilir. Örneğin UDIMET 720'li malzemesinden metal iç kapsüllü malzemeye geçilebilir. Maliyet azaltma çalışmaları içinde MPD uygulamalarının payı olmaktadır. MTU, bazı ringleri denemiştir ve EJ 200 motorunda seri üretime geçmek üzeredir.

## Ringlerin Püskürtme Dökümü (Spraycasting of rings SCR)

Püskürtme döküm prosesi Şekil 6 'da şematik olarak gösterilmiştir. Bir endüksiyon ocağında ergitilen alaşım, vakumlu seramik bir pota içerisinde ergimştir. Ergimiş alaşım buharı halindedir ve yüksek saflıkta bir argon gazı kütlesi ile püskürtülür. Üretimi amaçlanan parçanın iç profillerini içeren işlenmiş ve ön ısıtma ile ısıtılmış kalıba ergimiş alaşım doldurulur. Püskürtülen bu alaşım, hızlı soğutulma hızına bağlı olarak, çok homojen ve küçük tanecik iriliğine haiz (ASTM 5-7) bir malzeme olur.



## Ringlerin ve Kovanların (casing) Püskürtme Dökümleri



Şekil-6 Ringlerin Püskürtme Döküm ile İmalî Süreci (1)

Püskürtme dökümünün üstünlükleri, hafifliği ve işlem adımların azlığıdır. Bu da maliyet ve zamanı azaltmaktadır. Düşük çevrimli yorulmalarda, püskürtme döküm teknolojisini sunduğu mekanik özellikler (özellikle IN718 malzemesinde), dövme ve ring çekme teknolojilerine göre aynı ya da biraz daha iyidir. Malzeme işleminde, özellikle kesme hızı %25 artar. İnce tanecikli yapıda olduğu için, malzemenin tahribatsız muayenesi (NDT) daha iyidir. PW 4000 motorunun yüksek sıcaklık türbin'ine ait püskürtme döküm parçaları (IN 718), 1000 saatlik dayanıklılık test çevrimini başarı ile tamamlamıştır. Önümüzdeki yıllarda püskürtme şekillendirmesi ile üretilen parçalar (örneğin türbin kovanları), ticari motorlarda daha çok kullanılacaktır.

## SONUÇ

Önümüzdeki yıllarda türbinli motorlarda önemli temel değişiklik beklenmemesine rağmen, performanslar, daha iyi tasarımlarla artırılabilecektir. Bu da malzeme, imalat ve kaplama teknolojilerindeki ilerleme ile sağlanabilir.

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 Ti ve Nikel alaşımlardaki gelişmeler oldukça kısıtlı kalmıştır.

Malzemenin gelişimi, mukavemet/ağırlık oranının eniyileşmesi ile, intermetalik ve fiber takviyeli polimerler, metal veya seramik matrisli kompozitleri gündeme getirmiştir. Bunlar arasında yalnızca polimer matrisli kompozitler kullanıma geçmiş olmasına rağmen, diğerlerinin başarılı motor test sonuçlarına bakarak, aday malzemelerin hala gelişmeleri gerektiğini vurgulanmaktadır. Stabiliteleri hala tartışılır durumda olup fiyatları rekabet edebilir düzeyde değildir. Maliyet nedenleri ile Ti-MMC gibi malzemelerin herhangi bir tahribatlı muayene tekniğinden geçirmek hayli zordur.

Proses güvenilirliği ve kararlılığı, ilgili tüm parametrelerin sürekli izlenmesi ile geliştirilecektir.

## ***KAYNAKÇA***

- 1. Dr. Klaus Steffens/Dr.Hans Wilhelm from MTU Aero Engines, Next Engine Generations Materials Surface Technology, Manufacturing Technology,,What Comes After 2000? Bildiri ICAS 2201**
- 2. Pat I.Mangonon, Materials Selection Engineering Design, Florida Instute of Tehnology 1999**
- 3. Paul Degormo J.T. Black Ronald Kolster, Materials and Processes in Manufacturing, Prentice Hall**
- 4. Jack Kernebrock, Aircraft Engines and Gas turbines, MIT Press Cambridge**
- 5. Jack D. Mattingly, Elements of Gas Turbine Propulsion, Mcgrawhill Co 1996**
- 6. [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)**
- 7. [www.EJ200.com](http://www.EJ200.com)**
- 8. R. Dunker European Commission Aeronautics Research Series, 1993, John Wiley & Sons USA Pg.41**
- 9. Jack Mattingly,William Heise, David Pratt. AIAA Education Series USA ,2002 Pg.98**